



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECURIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES

PROYECCIÓN DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA
DEL RÍO MIRA: UNA VISIÓN A LOS AÑOS 2037 Y 2100

PLAN DE TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

AUTOR:

ELVIS RAÚL GUEVARA RUALES

DIRECTOR:

ING. DARIO PAÚL ARIAS MUÑOZ, MSc

OCTUBRE 2020



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
UNIVERSIDAD ACREDITADA RESOLUCIÓN Nro. 001-073-CEAACES-2013-13
Ibarra-Ecuador

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES

**CERTIFICACIÓN TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Ibarra, 10 de diciembre del 2020

Para los fines consiguientes, una vez revisado el documento en formato digital el trabajo de titulación: "PROYECCIÓN DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO MIRA: UNA VISIÓN A LOS AÑOS 2037 Y 2100", de autoría del señor/ita GUEVARA RUALES ELVIS RAÚL estudiante de la Carrera de INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES el tribunal tutor CERTIFICAMOS que el/la autor/a o autores ha procedido a incorporar en su trabajo de titulación las observaciones y sugerencia realizadas por este tribunal.

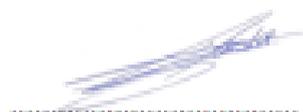
Atentamente,

TRIBUNAL TUTOR

MSe. Paúl Arias Muñoz, Ing.
DIRECTOR TRABAJO TITULACIÓN

FIRMA


MSe. Oscar Rosales, Ing.
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN



MSe. Melissa Layana, Ing.
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN



Misión Institucional:

Contribuir al desarrollo educativo, científico, tecnológico, socioeconómico y cultural de la región norte del país. Formar profesionales críticos, humanistas y éticos comprometidos con el cambio social.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004242366		
APELLIDOS Y NOMBRES:	GUEVARA RUALES ELVIS RAÚL		
DIRECCIÓN:	Ibarra, Avenida Eugenio Espejo y Los Eucaliptos		
EMAIL:	arguevaran@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062650594	TELÉFONO MÓVIL:	0990340923

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	PROYECCIÓN DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO MIRA: UNA VISIÓN A LOS AÑOS 2037 Y 2100
AUTOR (ES):	GUEVARA RUALES ELVIS RAÚL
FECHA: DD/MM/AAAA	11 DE DICIEMBRE DEL 2020
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ASESOR /DIRECTOR:	MSc. Darío Paúl Arias Muñoz, Ing.

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 11 días del mes de diciembre de 2020

EL AUTOR:

GUEVARA RUALES ELVIS RAÚL

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme cumplir con un objetivo más y por haberme dado el valor de nunca rendirme.

A la Universidad Técnica del Norte por haberme formado como persona y profesional, por enseñarme que todo sacrificio tiene su recompensa.

A mis profesores que con su paciencia y entusiasmo me formaron para un campo laboral muy competitivo.

A mi director de tesis Ing. Paúl Árias que me dio la confianza para poder desarrollar el trabajo de investigación. Agradezco su don de persona y su apoyo a pesar de las adversidades.

A mis asesores de tesis Ing. Oscar Rosales y PhD. James Rodríguez que con sus observaciones se logró un excelente trabajo.

No ha sido sencillo el camino que he recorrido, pero gracias a sus aportes, bondad y apoyo el éxito también lo será de ustedes.

¡Dios les pague!

Elvis Guevara

DEDICATORIA

A Dios por la vida y sus bendiciones para cumplir con mis objetivos.

A mi familia Lore, Joaquín y Santi que son mi inspiración y fortaleza para seguir adelante, donde existe amor nada podrá derrumbar. Cada momento ha sido vital contar con su apoyo y sobre todo con su amor.

A mi madre Nancy y padre Raúl que con su amor criaron buenos hijos con valores para poder desenvolvernos en el camino de la vida.

A mis hermanos Jhose, Santi y Anthony que con sus palabras han motivado y alegrado mi corazón.

A mis suegros Don Rodrigo y Doña Marianita por enseñarme a ser un buen padre y esposo, por enseñar con el ejemplo.

¡Por ustedes y para ustedes!

Elvis Guevara

ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido	Páginas
ÍNDICE DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Revisión de antecedentes o estado de arte	1
1.2. Problema de investigación y justificación	4
1.3. Objetivos.....	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	6
1.4. Pregunta directriz de la investigación.....	6
CAPÍTULO II	7
REVISIÓN DE LITERATURA	7
2.1. Marco teórico referencial.....	7
2.1.1. Cambio de uso del suelo (CUS).....	7
2.1.2. Cuenca hidrográfica	9
2.1.3. Ecosistema	10
2.1.4. Estrategias de ordenamiento territorial	10
2.2. Marco legal	12
2.2.1. Constitución de la República del Ecuador	12
2.2.2. Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD).....	13

2.2.3.	Código Orgánico de Planificación y Finanzas Públicas (COPFP)	15
2.2.4.	Código Orgánico del Ambiente (COA).....	15
2.2.5.	Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión del Suelo (LOOTUGS)	16
2.2.6.	Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales	16
2.2.7.	Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA)	17
2.2.8.	Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC)	18
CAPÍTULO III.....	.....	19
METODOLOGÍA .....	.....	19
3.1. Descripción del área de estudio .....	.....	19
3.1.1. Ubicación .....	.....	19
3.1.2. Componentes biofísicos .....	.....	20
3.2. Limitaciones .....	.....	28
3.3. Métodos .....	.....	29
3.2.1. Etapa 1. Determinación del cambio de cobertura y uso del suelo en la cuenca del río Mira para el período 1996 - 2018 .....	.....	30
3.2.2. Etapa 2. Proyección de dos escenarios explicativos del cambio de uso del suelo para los años 2037 y 2100 .....	.....	36
3.2.2. Etapa 3. Análisis de los cambios en las categorías de uso del suelo con el fin de proponer estrategias de ordenamiento territorial.....	.....	41
3.4. Materiales y equipos .....	.....	42
CAPÍTULO IV .....	.....	43
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	.....	43
4.1. Cambio de cobertura y uso del suelo para el período 1996 – 2018.....	.....	43
4.2. Proyección de dos escenarios explicativos del cambio de uso del suelo para los años 2037 y 2100 .....	.....	45

4.3. Análisis de los cambios en las categorías de uso del suelo con el fin de proponer estrategias de ordenamiento territorial	48
Programa de regulación de prácticas agrícolas	54
CAPÍTULO V.....	58
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	58
5.1. Conclusiones.....	58
5.2. Recomendaciones	60
REFERENCIAS	61
ANEXOS.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación del área de estudio.	20
Tabla 2. Principales ríos del área de estudio.	21
Tabla 3. Cuerpos de agua en el área de estudio.	21
Tabla 4. Pendientes y porcentaje del área de estudio.	22
Tabla 5. Cantidad de población por cantones hasta el año 2020.	27
Tabla 6. Características de las imágenes satelitales.	30
Tabla 7. Categorías de coberturas y usos del suelo.	33
Tabla 8. Análisis estadístico para la determinación de la muestra.	33
Tabla 9. Valoración del coeficiente Kappa.	35
Tabla 10. Características de los rasters usados en el Terrset.	36
Tabla 11. Transiciones del sub-modelo Disturbios.	40
Tabla 12. Análisis del test de Cramer's V.	40
Tabla 13. Materiales, Equipos y Softwares utilizados en el estudio.	42
Tabla 14. Superficies de las coberturas y usos del suelo del área de estudio de los años 1996, 2007 y 2018.	43
Tabla 15. Aumento y disminución del cambio de cobertura y uso del suelo para el periodo 1996-2018.	44
Tabla 16. Matriz de validación del modelo 2018 con los puntos de control registrados en campo.	45
Tabla 17. Determinación de sectores en base a los cambios de uso del suelo de la investigación.	50
Tabla 17. Marco ordenador presión-estado-respuesta y actividades para desarrollar el programa.	52
Tabla 18. Marco ordenador presión-estado-respuesta y actividades para desarrollar el programa.	54
Tabla 19. Marco ordenador presión - estado - respuesta y actividades para el programa.	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Mira, Ecuador.	19
Figura 2. Orden hidrográfico del área de estudio.	20
Figura 3. Pendientes del área de estudio.	22
Figura 4. Taxonomía del suelo del área de estudio.	23
Figura 5. Precipitación en mm del área de estudio.	24
Figura 6. Temperatura en °C del área de estudio.	25
Figura 7. Zonas de vida de la cuenca del río Mira.	26
Figura 8. Mapa base de la cuenca del río Mira.	28
Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología utilizada en este estudio.	29
Figura 10. Área de entrenamiento en campo (Cuadrante).	34
Figura 11. Variables estáticas: a) Modelo de Elevación, b) Pendientes, d) Vías y f) Ríos. Variables dinámicas: c) Distancia Euclidiana Zona Urbana y c) Distancia Euclidiana Vías.	37
Figura 12. Variable de restricción de CUS del área de estudio.	38
Figura 13. Tendencias de cambio: a) Bosque a Cultivos, b) Cultivos a Áreas sin Vegetación, c) Cultivos a Zonas Urbanas, d) Páramos a Cultivos, e) Vegetación Arbustiva a Cultivos y f) Vegetación Arbustiva a Zonas Urbanas.	39
Figura 14. Marco Presión-Estado-Respuesta con base en OCDE (1993).	41
Figura 15. Mapas de cobertura y uso del suelo de la cuenca del río Mira. a) 1996, b) 2007 y c) 2018.	44
Figura 16. Modelo de cambio de uso del suelo del año 2037 del área de estudio.	46
Figura 17. Cambio de cobertura y uso del suelo simulado del periodo 1996-2037 en hectáreas (ha).	47
Figura 18. Mapa de cambios de uso del suelo para el periodo 1996 - 2018.	48
Figura 19. Mapa clasificado del CUS en el área de estudio.	49
Figura 20. Marco ordenador Presión - Estado - Respuesta de la investigación.	51
Figura 21. Zonificación de prácticas agrícolas en la investigación.	54
Figura 22. Crecimiento de la zona urbana en el cantón Ibarra.	56

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES

PROYECCIÓN DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA
DEL RÍO MIRA: UNA VISIÓN A LOS AÑOS 2037 Y 2100

Elvis Raúl Guevara Ruales

RESUMEN

El cambio de uso del suelo (CUS) es el proceso mediante el cual las actividades humanas transforman el paisaje natural, las principales causas son: el avance de la frontera agrícola, la deforestación y el crecimiento poblacional. La cuenca del río Mira se encuentra en dos hotspots de biodiversidad importantes a nivel mundial: Los Andes Tropicales y Tumbes – Chocó – Magdalena. En este sentido, la investigación se enfocó en evaluar el cambio de uso del suelo en la cuenca del río Mira para el período 1996 – 2100, con la finalidad de proponer estrategias de ordenamiento territorial. Se realizó una clasificación supervisada de las imágenes satelitales de los años 1996, 2007 y 2018, y se determinó el cambio de las categorías. El área sin vegetación durante el período 1996 – 2018 registró un aumento de 10 427 ha, tres veces más que el resultado registrado en el año inicial. Luego, se utilizó el software Terrset 1.0 para determinar la dinámica del CUS para el período 1996 – 2018 y se proyectó un modelo tendencial para el año 2037, donde se observó un aumento del 26% de las zonas urbanas reemplazando las áreas de cultivos y pastos. Finalmente, se demostró que el CUS está fuertemente vinculado a las actividades antrópicas y se elaboró estrategias de ordenamiento territorial enfocadas a: planificación estratégica, educación ambiental, seguimiento y control.

Palabras clave: Cambio de uso del suelo (CUS), clasificación supervisada, proyección futura, estrategias de ordenamiento territorial.

ABSTRACT

Land use change (LUC) is the process by which human activities transform the natural landscape, the main causes are: the advance of the agricultural frontier, deforestation and population growth. The Mira River basin is located in two important biodiversity hotspots worldwide: Tropical Andes and Tumbes - Chocó - Magdalena. In this sense, the research focused on evaluating the change in land use in the Mira river basin for the period 1996 - 2100, in order to propose land use planning strategies. A supervised classification of the satellite images of the years 1996, 2007 and 2018 was carried out, and the change of the categories was determined. The area without vegetation during the period 1996 - 2018 has increased, in 2018 there was 15 222 ha, three times more than the result registered in the initial year. Then, the Terrset 1.0 software was used to determine the dynamics of the CUS for the period 1996 - 2018 and a trend model was projected for the year 2037, where a 26% increase in urban areas was observed replacing the areas of crops and pastures . Finally, it was demonstrated that the CUS is strongly linked to anthropic activities and territorial planning strategies were developed focused on: strategic planning, environmental education, monitoring and control.

Keywords: Land use change (CUS), supervised classification, future projection, land use planning strategies.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Revisión de antecedentes o estado de arte

El cambio de uso del suelo (CUS), definido en términos generales como el proceso mediante el cual las actividades humanas transforman el paisaje natural (Paul y Rashid, 2017; John, Chithra y Thampi, 2019), es generado por procesos antropogénicos como la expansión agrícola y urbana, entre otros, los cuales homogenizan el paisaje (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; De Freitas, Muñoz, Dos Santos y Alves, 2018; Lang y Song, 2019). En este sentido, el CUS se origina debido a la demanda de satisfacer las necesidades humanas inmediatas, como alimentos, combustible y refugios, etc (Wang, Li, Zhang, Li y Zhou, 2018). El CUS se ha identificado como el principal conductor del cambio global, el cual es la principal amenaza para el paisaje natural, lo que conduce a la degradación, fragmentación y deforestación del hábitat (Halmy, Gessler, Hicke y Salem, 2015; Rodríguez-Echeverry, Echeverría, Oyarzún y Morales, 2018). A todo esto, Otavo y Echeverría (2017), y Armenteras et al. (2016), definen a la deforestación y degradación como procesos con conceptos diferentes, y argumentan que la deforestación es una conversión de la cubierta vegetal, a diferencia que la degradación disminuye mientras se mantiene la cubierta.

De acuerdo con lo anterior, se han realizado varios estudios alrededor del mundo que identifican el CUS como la perturbación antropogénica más importante para el ambiente (Gibson, Much, Palmer y Mantel, 2018; Anand, Gosain y Khosa, 2018; Ansari y Golabi, 2018). En el continente europeo, Ubalde, Rius y Poch (1999) y Lasanta-Martínez (1996), recalcaron que el CUS en las montañas españolas en el año de 1970 desencadenó una disminución de población, principalmente en las zonas de producción agropecuaria donde se derivó problemas socio-económicos. En el continente africano, Gibson, Much, Palmer y Mantel (2018) y Much, Okoye, Gibson, Mantel y Palmer (2017), enfatizaron que el problema causado por el CUS en el sur de África ha ocasionado cambios micro-climáticos que derivaron en efectos negativos en el paisaje y ecosistemas. Además, comentaron que los

servicios ecosistémicos se encuentran afectados y repercuten en la población aledaña a los ecosistemas intervenidos. De igual forma, el continente asiático es el lugar donde también se muestra el CUS debido a la extracción de recursos naturales para el desarrollo industrial y Zhao et al. (2006) y Tomich, Thomas y Van Noordwijk (2004), analizaron las consecuencias del CUS y mostraron que el continente asiático ha tenido consecuencias ecológicas negativas sustanciales, que derivaron en el aumento de emisiones antropogénicas de CO₂, el deterioro de la calidad del aire y agua, la alteración del clima regional, un aumento de enfermedades y pérdida de biodiversidad. Además, mencionaron que a pesar de que el CUS ocurre a nivel local, tiene el potencial de causar impacto ecológico a escala local, regional y global. En ese sentido, el panorama de Latino América es el mismo, Grau y Aide (2008), explicaron que el resultado del desarrollo es debido a la insostenible explotación de los recursos naturales mundiales, particularmente fósiles y a la transformación de sistemas naturales. También demostraron que las principales consecuencias de la conversión de ecosistemas naturales en tierras agrícolas son la pérdida de biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

En ese contexto, Armenteras et al. (2019), califica a la comprensión del CUS como una herramienta importante para la toma de decisiones en la planificación territorial. Además, varios investigadores concluyen que el CUS está ocurriendo debido a tres factores: factores biofísicos, físicos y socioeconómicos (Islam, Rahman y Jashimuddin, 2018; Hegazy y Kaloop, 2015). Aunque estos estudios han generado una mejor comprensión del CUS, se deben realizar investigaciones que permitan comprender la dinámica del CUS y sus futuras interacciones, las cuales deben estar enfocadas a dar solución al ordenamiento territorial, uso y gestión de los recursos naturales (Armenteras et al., 2019; Halmy et al., 2015).

Evidentemente la necesidad de comprender la dinámica del CUS es urgente y con la mejora masiva de las tecnologías basadas en satélites, los investigadores utilizan técnicas de detección remota y de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el aspecto más amplio de la ciencia del CUS (Islam et al., 2018). La disponibilidad de datos detectados remotamente y los crecientes avances en sus resoluciones temporales, espaciales y espectrales proporcionan herramientas para detectar el

CUS en diferentes escalas espaciales (Halmy et al., 2015). En este sentido, se han utilizado diferentes métodos desarrollados para la detección del CUS utilizando datos de detección remota (Riccioli, El Asmar, El Asmar y Fratini, 2012; Tian, Ouyang, Quan y Wu, 2011; Yang, Zheng y Li, 2012). Los modelos del CUS generalmente buscan detectar dónde ocurrió y ocurrirá el cambio potencial, y se utilizan para evaluar el impacto acumulativo del uso del suelo (Halmy et al., 2015).

En este contexto, varios investigadores han utilizado la metodología de Markov-CA en sus respectivos estudios: Yang, Zhen y Chen (2014), elaboraron una proyección futura del CUS basada en el análisis de los servicios ecosistémicos en Wuhan, China. Del mismo modo, Halmy et al. (2015), aplica la metodología de Markov-CA en la costa desértica noreste de Egipto, donde los resultados sirvieron como base para la elaboración de estrategias de conservación y planificación de uso del suelo frente a los impactos antrópicos. De igual forma, Islam et al. (2018), aplicó el modelo en la zona boscosa de Bangladesh, el cual ayudó a tomar las medidas adecuadas en la gestión del hábitat crítico antes de que se produzca una mayor degradación. En este sentido, para comprender la influencia de las intervenciones humanas en las condiciones ambientales naturales, incluidos los problemas mencionados anteriormente, es esencial examinar críticamente el CUS durante un periodo de tiempo mediante Markov-CA (John et al., 2019).

A nivel global, se han realizado varios estudios que analizan el CUS, pero un panorama diferente se evidencia en Ecuador. De Konning, Veldkamp y Fresco (1998), fueron los únicos que estudiaron la dinámica del CUS en el país. Ésta se basó en la descripción empírica de los impulsores biogeofísicos y socioeconómicos del uso del suelo en diferentes niveles de agregación. Sin embargo, se han realizado varios trabajos de análisis multitemporal de la cobertura vegetal (Paula, Zambrano y Paula, 2018), que han generado información general del estado del uso del suelo en el país. El Ecuador tiene un uso de suelo dinámico y en expansión, éste tiene importantes efectos en los recursos naturales del país y la sostenibilidad del uso del suelo (De Konning, 1998), lo que da lugar a que el paisaje natural se encuentre en un proceso progresivo de deterioro (Damanik-Ambarita, 2018).

1.2. Problema de investigación y justificación

En el norte de Ecuador se encuentra la cuenca del río Mira, en la cual el cambio de uso del suelo ha afectado negativamente a la biodiversidad y a las fuentes hídricas, debido a que se han deforestado diferentes tipos de ecosistemas boscosos y se han efectuado quemas para el desarrollo de la actividad agropecuaria, específicamente para el cultivo de palma de aceite, cacao, caña de azúcar y pastos para el ganado, por lo cual, estas malas prácticas han ocasionado que incremente la deforestación, la erosión de la cuenca y la contaminación de las fuentes hídricas, en consecuencia, los hábitats y las especies de flora y fauna cada vez se encuentran más amenazadas, incrementando el riesgo de extinción (Gómez, Gallego y Naranjo, 2017; Caviedes, 2018). Adicionalmente, en la cuenca baja del río Mira ha disminuido el rendimiento de los productos cultivados, razón por la cual, los agricultores han optado por incrementar la cantidad de productos químicos durante el proceso del cultivo, con el fin de acrecentar la cantidad de éstos, sin embargo, no han obtenido resultados positivos (Vilca, 2008).

Cabe mencionar que la deforestación en la cuenca del río Mira está estrechamente relacionada con la disminución en la producción de caudales, ya que, los bosques de transición de páramos a las partes bajas contribuyen en la producción de agua y en la regulación hídrica. Además, la calidad del agua y la conservación de las especies ícticas se ven comprometidas por la inadecuada disposición de los desechos sólidos generados por la actividad humana (Vilca, 2008; Endara, 2018). Pese a la gran importancia hídrica y ecológica que poseen estos bosques, no se han implementado proyectos de forestación y reforestación que permitan controlar y mitigar la degradación de los recursos naturales de la cuenca (Vilca, 2008).

Eminentemente, la cuenca del río Mira es agropecuaria y el uso de suelo ha ido variando notablemente, debido a la demanda de comercialización de productos agrícolas (Chuqín e Ibarra, 2015). El CUS en el área de estudio no es tema de conocimiento de los pobladores, de ahí la principal causa que deriva a que éste problema esté latente. Además, cabe mencionar que la industria extractiva se

encuentra desarrollándose dentro de la cuenca (Vandegrift, Thomas, Roy y Levy, 2018).

A la fecha, se han realizado varias investigaciones sobre: reporte de salud de la cuenca, biodiversidad, escorrentía, balance hídrico, agua de riego y gobernanza, acequias, calidad del agua, integridad ecológica, entre otros (Pantoja y Poats, 2019). Sin embargo, estudios que aborden la problemática del CUS y su proyección a futuro no han sido realizados, debido al desconocimiento que existe en la población sobre sus amenazas.

En virtud de lo antes mencionado; la presente investigación, tiene la finalidad de analizar la transición de cambio de uso del suelo que ha ocurrido durante los periodos de 1996-2018, enfocado en el estudio de los principales conductores antrópicos del CUS, con el fin de proponer estrategias de conservación. Además, la predicción al año 2037 permitirá comprender la dinámica del CUS y sus futuras alteraciones, las cuales deberán estar encaminadas a solucionar problemas de planificación territorial, uso y gestión de los recursos naturales.

Ante esta situación, la investigación tiene un alto nivel de importancia que permitirá proponer estrategias de mitigación al cambio de uso de suelo, con la finalidad de conservar y lograr menos impacto posible. La cuenca del río Mira se encuentra en dos hotspot de biodiversidad que son de importancia mundial: los Andes Tropicales y Tumbes-Chocó-Magdalena, por lo tanto, es de gran interés realizar este estudio, mismo que se encuentra enmarcado a los objetivos 1, 3 y 7 del Plan Nacional de Desarrollo 2017 – 2021 “Toda una Vida”.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Evaluar el cambio de uso del suelo en la cuenca del río Mira para el período 1996 – 2100.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar el cambio de cobertura y uso del suelo para el período 1996 – 2018.
- Proyectar dos escenarios explicativos del cambio de uso del suelo para los años 2037 y 2100.
- Analizar los cambios en las categorías de uso del suelo con el fin de proponer estrategias de ordenamiento territorial.

1.4. Pregunta directriz de la investigación

Al estudio le concierne las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cómo es el cambio de uso de suelo en la cuenca del río Mira?
- ¿Cuál es la tendencia del cambio de uso de suelo en la cuenca del río Mira?

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico referencial

A continuación, se presenta la principal información que fue de vital importancia en el desarrollo de esta investigación:

2.1.1. Cambio de uso del suelo (CUS)

Yang et al. (2019), define en términos generales al CUS como el impacto negativo que sufren los paisajes naturales debido a los cambios en las estructuras de los ecosistemas, que son fundamentales para las funciones del mismo. Pineda (2011) y López et al. (2015), definen al CUS como el proceso, forma y manera en que se emplea un terreno y su cubierta vegetal para satisfacer necesidades espirituales o materiales de la sociedad. En este sentido, las actividades antropogénicas cada vez más alteran la estructura, función y composición de la cobertura vegetal y el CUS se convierte en el principal impulsor de cambios en el patrón espacial y en la provisión de servicios ecosistémicos, y las causas son: deforestación, degradación y fragmentación (Amin et al., 2018; Rodríguez-Echeverry et al., 2018; Yang et al., 2019).

- **Deforestación**

La deforestación es la eliminación permanente de la cubierta forestal por parte de las personas y la conversión de tierras para otros usos, como la agricultura y la infraestructura (Amarnath, Babar y Merthy, 2017). La deforestación es mayor en áreas que son más accesibles para las zonas urbanas principales y donde la agricultura, ganadería y quemas son más fáciles (Reydon, Fernandes y Telles, 2019).

Reydon et al. (2019), identifica cuatros factores principales que impulsan la deforestación, y estos son: primero, los beneficios asociados con el uso del suelo

(aumento de precios agrícolas, de tierras, de insumos, de madera y reducción de salarios rurales); segundo, políticas públicas deficientes y sin incentivos ambientales; tercero, construcción de carreteras y obras que facilitan el acceso a zonas fronterizas; y cuarto, el rápido crecimiento poblacional y la evolución de las macroeconomías.

- **Fragmentación**

La fragmentación, es definido en términos generales como el proceso dinámico y multidireccional en el cual parches continuos de bosque se dividen gradualmente en pequeños fragmentos más aislados, este fenómeno influye en la diversidad de especies, destruye el balance de energía del ecosistema y flujo de material, y da como resultado una serie de consecuencias biológicas (Hermosilla et al., 2019; Ren, Lv y Li, 2017).

Dwomoh, Wimberly, Cochrane y Numata (2019), aseguran que los bosques fragmentados son altamente vulnerables a sequías e incendios debido a mayores efectos de borde que alteran el bosque. La fragmentación es la principal causa de la pérdida de hábitat y conduce a cambios en su configuración espacial (Puttker et al., 2020), y se puede cuantificar a través de un conjunto de métricas de patrones espaciales que informan sobre la cantidad y configuración de parches, distribución de tamaños de parche y efectos de borde (Hermosilla et al., 2019).

- **Degradación**

La degradación es un problema ambiental que disminuye la capacidad de subsistencia de las especies debido al agotamiento de recursos naturales (Pang et al., 2019). Este fenómeno ocurre con facilidad en áreas boscosas fragmentadas debido a que se crean microclimas diferentes y comprometen la resiliencia forestal y en último caso deriva en la pérdida de bosques (Dwomoh et al., 2019).

Mondal, McDermond y Qadir (2020), mencionan en su investigación que la salud del bosque también se considera una forma de degradación, incluidos, entre otros,

tala de bosques, cambio y reducción de diversidad de especies y los efectos de enfermedades e incendios.

2.1.2. Cuenca hidrográfica

González (2009), considera a una cuenca hidrográfica como una unidad ambiental básica, donde el agua es drenada a una corriente en común como resultado de escorrentía superficial y escorrentía subterránea, esto permite que a diferentes niveles de altura se establezcan ecosistemas particulares y son generadores de servicios ecosistémicos, a la vez estos sean aprovechados por los asentamientos humanos que se encuentran en constante desarrollo. Un manejo adecuado y una gestión integral de la cuenca hidrográfica conlleva a disminuir su vulnerabilidad, tanto que las actividades antrópicas deben regularizarse a partir de decisiones políticas y que permitan garantizar un impacto mínimo al ambiente.

Para alcanzar una armonía con el ambiente en función de las necesidades del hombre, se debe aprovechar los recursos naturales de forma racional (Lazo y Parraga, 2012). Dando lugar al manejo adecuado de las cuencas hidrográficas que no solo se encarga del recurso hídrico, sino que además se encarga de unir varios actores sociales que en conjunto buscan fortalecer una visión integrada, para lograr un buen manejo ambiental (Cervantes-Zavala, Faustino, Jiménez Otárola, Benegas, y Zavala, 2008).

Behera et al. (2018), califica a la cuenca hidrográfica como una unidad multifuncional en todas las perspectivas, es decir, hidrológica, biofísica, socioeconómica, entre otros. En este sentido, la cuenca hidrográfica está estrechamente relacionada con la sociedad, ya que dentro de la misma se realizan actividades antrópicas y generan una intensificación en el uso del suelo que afecta negativamente en la salud de la cuenca a través del aumento de extremos hidrológicos y cargas contaminantes de escorrentías urbanas y agrícolas (Ervinia, Huang, Huang y Lin, 2019).

2.1.3. Ecosistema

Ecosistema, está definido como el conjunto de organismos vivos que se encuentra en el ambiente e interactúan entre sí y con factores físicos que los rodean (Armenteras et al., 2016); A nivel mundial, existen un sin número de ecosistemas, siendo el ecosistema boscoso uno de los más importantes debido a que forma la mayor reserva de carbono de todos los ecosistemas terrestres, jugando un papel principal en la mitigación y regulación del cambio climático global (Feng et al., 2020).

El fuerte impacto negativo sobre los ecosistemas se debe a la presión humana y resulta en el cambio de uso del suelo, cambio biogeoquímico global, cambio climático, pérdida de áreas y especies silvestres (Tapia-Armijos, Homeier y Draper, 2017). Además, la transformación de la tierra está fuertemente asociada con la dinámica comercial a nivel nacional e internacional, así como a la demanda de recursos y a los niveles de riqueza (Venter, 2016). En ese contexto, los cambios en el uso del suelo alteran los patrones del paisaje y afectan el funcionamiento de los ecosistemas, incluida su capacidad para regular los procesos hidrológicos (Shirmohammadi et al., 2020).

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2018), los bosques tienen un rol sustancial en lo que concierne a fortalecer los medios de vida del planeta, es decir, brindan beneficios importantes a las personas, regula el cambio climático, conserva la biodiversidad y suministra aire y agua para la subsistencia de la vida.

2.1.4. Estrategias de ordenamiento territorial

Muchos lugares en el mundo han sufrido dramáticas y repentinas transformaciones en su territorio a lo largo del tiempo y la principal causa se debe a la deficiente gobernanza, a falta de coordinación e implementación de estrategias (Van Assche, Gruezmacher y Deacon, 2019). En ese sentido, para la formulación de estrategias adecuadas de uso del suelo para la gestión sostenible de los paisajes urbanos se

requiere evaluar el potencial impacto de la futura expansión en el territorio (Wu et al., 2019).

- **Proyección a futuro**

La proyección a futuro del cambio de uso del suelo es importante debido a que se utiliza como herramienta para resolver una variedad de problemas de planificación y gestión, así como para la investigación académica (Yang, Zheng y Li, 2012). Sin embargo, proyectar el CUS es altamente complejo debido a la dinámica constante a la que está sometido el territorio y particularmente por que los factores naturales y humanos pueden funcionar a diferentes escalas (Lambin et al., 2001).

Hasta la actualidad se han utilizado una variedad de métodos para modelar el CUS, Yang, Zheng y Li (2012), mencionan en su investigación 3 métodos: colonias de hormigas, cadenas de Markov y autómatas celulares. En el presente estudio se utilizará la metodología de cadenas de Markov.

- **Cadenas de Markov**

El modelo de Markov es ampliamente utilizado para modelar el cambio de uso del suelo a diferentes escalas y estudia las probabilidades de transición de diferentes estados, en consecuencia, determina la tendencia de desarrollo y predice el estado futuro (Sathees, Nisha y Samson, 2014). Es así que los procesos de monitoreo y análisis del CUS son necesarios para proporcionar información sobre los patrones y cambios de uso del suelo para que los responsables de la toma de decisiones apoyen el desarrollo sostenible (Hamad, Balzter y Kolo, 2018).

- **Ordenamiento territorial**

El ordenamiento territorial en Ecuador ha sufrido una evolución positiva dentro del ámbito legal, así el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (2018), en su estudio sobre conceptos básicos que dicta la Ley Orgánica de Ordenamiento

Territorial, Uso y Gestión del Suelo, define al ordenamiento territorial como el proceso y resultado de organización espacial y funcional de las actividades y recursos en el territorio, con la concreción de políticas públicas democráticas y participativas. Zamora y Carrión (2013), coinciden que el ordenamiento territorial es la organización del uso del suelo en función a factores como: biofísicos, socioeconómicos, culturales ambientales y político-institucionales, que tienen como objetivo impulsar el desarrollo sostenible.

Es importante destacar el ordenamiento territorial debido a que se focaliza la inversión pública y se convierte en un mecanismo fundamental de desarrollo de la economía y reducción de la pobreza (López, 2015). En ese contexto, nace la necesidad de planificar el territorio de manera integral bajo criterios de gestión administrativa y financiera que articule la planificación con la gestión (Zamora y Carrión, 2013).

2.2. Marco legal

El desarrollo del presente trabajo de investigación se enmarca a la normativa legal vigente y aplicable en el Ecuador, se explicará a continuación de forma jerárquica tal como lo establece el artículo 425 de la Constitución de la República del Ecuador.

2.2.1. Constitución de la República del Ecuador

La Constitución de la República del Ecuador fue publicada en el Registro Oficial No. 449 del 20 de octubre del 2008. En materia ambiental y de desarrollo, define los lineamientos generales que forman el marco principal de referencia para el desarrollo del presente proyecto. Es así que los artículos 409 y 410 constantes en el Título VII, Régimen del Buen Vivir, Capítulo II, Sección Quinta, referente al suelo hace mención al desarrollo de proyectos de conservación y restauración y establecen la creación de políticas públicas que garanticen la conservación y restauración del suelo sea cual fuere su uso.

El artículo 3 de la Carta Magna, reconoce que es deber primordial del Estado: planificar el desarrollo nacional, erradicar la pobreza, promover el desarrollo sustentable y la redistribución equitativa de los recursos y la riqueza, para acceder al buen vivir; en concordancia con el artículo 276 del mismo cuerpo legal que garantiza dentro del régimen de desarrollo, la realización del buen vivir o sumak kawsay, teniendo como objetivo el de recuperar y conservar la naturaleza y mantener un ambiente sano y sustentable que garantice a las personas y colectividades el acceso equitativo, permanente y de calidad al agua, aire, suelo y demás beneficios de los recursos y del patrimonio natural.

La consecución del buen vivir o sumak kawsay genera deberes y obligaciones para el Estado, para las personas y colectividades y sus diversas formas organizativas, correspondiéndoles participar en todas las fases y espacios de la gestión pública y de la planificación del desarrollo nacional y local, y en la ejecución y control del cumplimiento de los planes de desarrollo en todos sus niveles, siempre garantizando el cuidado y protección de la naturaleza como sujeto de derecho.

El artículo 321 de la Constitución de la República del Ecuador garantiza y reconoce el derecho a la propiedad en todas sus formas debidamente avaladas por la ley, y dispone el deber de cumplir funciones sociales y ambientales; a lo que se enlaza lo establecido en el artículo 31 ibídem que instaura normas urbanísticas ligadas a los principios de sustentabilidad, justicia social, respeto a las diferentes culturas urbanas y equilibrio entre lo urbano y lo rural.

2.2.2. Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD)

Dentro de las leyes orgánicas vigentes en el territorio ecuatoriano, destacamos el Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD) que fue publicado mediante suplemento del Registro Oficial No. 303 el 19 de octubre de 2010. El artículo 32 se refiere a que la cuenca hidrográfica debe ser competencia exclusiva de los gobiernos autónomos descentralizados regionales

y los mismos deben crear un consejo de cuenca para su gestión, garantizando los derechos del recurso hídrico y del suelo.

El artículo 132 del COOTAD regula el ejercicio de la competencia de gestión de cuencas hidrográficas y dispone que los gobiernos autónomos descentralizados regionales propicien la creación y lideren, una vez constituidos, los consejos de cuenca hidrográfica, mismos que tienen prohibida la adopción como modelo de gestión que suponga algún tipo de privatización del recurso hídrico. Regula también el ordenamiento de cuencas hidrográficas mediante la articulación efectiva de los planes de ordenamiento territorial de los gobiernos autónomos descentralizados de la cuenca hidrográfica respectiva.

Los artículos 54, 55, 133, 136, 186 y 294 se refieren al suelo como un sujeto en donde se organizan las actividades humanas con el fin del desarrollo local, la entidad que se encarga de su manejo es el gobierno autónomo descentralizado municipal.

El ejercicio de la competencia de fomento de actividades productivas y agropecuarias, así como el ejercicio de competencias de infraestructura y construcción es importante dentro de este estudio debido a que él mismo tiene como uno de sus parámetros la regularización en estos campos enfocado en lo que la normativa dispone apegado al principio pro natura.

La definición de estrategias participativas de apoyo a la producción; el fortalecimiento de las cadenas productivas con un enfoque de equidad; la generación y democratización de los servicios técnicos y financieros a la producción; la transferencia de tecnología, desarrollo del conocimiento y preservación de los saberes ancestrales orientados a la producción; la agregación de valor para lo cual se promoverá la investigación científica y tecnológica; la construcción de infraestructura de apoyo a la producción; son actividades reguladas por los Gobiernos Autónomos Descentralizados, normados y delegados dentro del

ejercicio de competencia que les otorga el COOTAD y que se determinan en el artículo 135 de dicho cuerpo legal.

Los gobiernos autónomos descentralizados municipales definirán en su cantón el modelo de gestión y aplicación de la norma mediante ordenanzas en lo que se refiere a construcciones e infraestructura, tomando en cuenta que tienen la responsabilidad de planificar, regular y controlar estas actividades mediante permisos de construcción y demás mecanismos que serán definidos por cada GAD.

2.2.3. Código Orgánico de Planificación y Finanzas Públicas (COPFP)

Este cuerpo legal fue publicado mediante registro oficial No. 306 y en sus artículos 42 y 43 detallan los requisitos mínimos que debe contener la herramienta principal de planificación del desarrollo y ordenamiento territorial en los niveles descentralizados que es el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT). También, en el Capítulo III, Sección II, establece los lineamientos y políticas del sistema del plan nacional de desarrollo y la estrategia territorial nacional.

2.2.4. Código Orgánico del Ambiente (COA)

El Código Orgánico del Ambiente (COA) publicado mediante Registro Oficial No. 983 el 12 de abril de 2017 es una ley orgánica que agrupa varias leyes que se encontraban dispersas, como es el caso de la Ley Forestal que fue derogada por el COA. Dentro de este documento el recurso suelo se lo califica como un bien ambiental y el artículo 5 en su inciso 5 así los ratifica, “La conservación y uso sostenible del suelo...”. También, los artículos 94 y 99 sobre la conservación de la cobertura vegetal amparan a la conservación del uso de suelo de los patrimonios forestales nacionales, páramos, moretales y ecosistemas de manglar, y prohíbe su transformación a suelos agropecuarios. El artículo 118 sobre la restauración ecológica se refiere al suelo degradado como prioridad para su restauración natural, cuya competencia la poseen los gobiernos autónomos descentralizados. También es importante mencionar el artículo 197 sobre las actividades que afecten la calidad del suelo, mismas que serán reguladas y si es el caso, restringidas. Finalmente, la

disposición transitoria sexta recalca que el uso de suelo será evaluado por la Autoridad Ambiental Nacional de las áreas que conforman el Sistema Nacional de Área Protegidas y Patrimonio Forestal Nacional.

2.2.5. Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión del Suelo (LOOTUGS)

La Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión del Suelo (LOOTUGS) publicada mediante registro oficial No. 790, creada con el objetivo de ocuparse de las relaciones del ser humano con su entorno urbano y rural, y cubrir el asidero del derecho administrativo que deja el COOTAD y el COPFP. El artículo 9 define el ordenamiento territorial y destaca que es una obligación para todos los niveles de gobierno. Este cuerpo legal, menciona los instrumentos para el ordenamiento territorial local en su Capítulo II, artículo 12, y los clasifica en: instrumentos supranacional, nacional y regional, provincial, cantonal, parroquial rural y regímenes especiales. El artículo 27 dispone que los gobiernos autónomos descentralizados y metropolitanos deberán presentar un plan de uso y gestión del suelo (PUGS).

El artículo 41 regula los polígonos de intervención territorial e indica que son las áreas urbanas o rurales definidas por los planes de uso y gestión de suelo, dadas desde la identificación de características ambientales, paisajísticas, urbanísticas, así como de la capacidad de soporte del territorio, o de grandes obras de infraestructura con alto impacto, sobre las cuales se deben aplicar los tratamientos correspondientes con la finalidad de aprovechar sus potencialidades de manera sustentable y sostenible.

2.2.6. Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales

La Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales, publicada en el Registro Oficial, Suplemento 711 de 14 de marzo de 2016 y reformada el 21 de agosto de 2018.

El artículo 6 de la Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales, sobre la prioridad nacional, manifiesta que la protección y uso del suelo rural de producción destinado a garantizar el derecho a la alimentación y a la soberanía alimentaria es de interés público, por lo que se debe tomar las medidas para prevenir la degradación provocada por el uso intensivo del mismo. En ese sentido, los Gobiernos Autónomos Descentralizados municipales y metropolitanos tienen la competencia de declarar zonas industriales y de expansión urbana en suelos rurales que no tengan aptitudes para el desarrollo de actividades agropecuarias.

El artículo 13 regula ambientalmente a la propiedad rural donde existan ecosistemas frágiles, y dispone que no se podrá ampliar la frontera agrícola o el aprovechamiento agrario existente de tales ecosistemas; sin embargo, da la posibilidad de realizar este tipo de actividades mediante un instrumento de manejo que cumpla con los parámetros que da la Autoridad Ambiental Nacional.

2.2.7. Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA)

El Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente, publicado en el Registro Oficial Edición Oficial Nro. 2 de 31 de marzo de 2003 y reformado mediante Decreto Ejecutivo 3516 de 12 de abril de 2019.

El artículo 16 de este cuerpo legal define a los bosques y vegetación protectores como aquellas formaciones vegetales, naturales o cultivadas, arbóreas, arbustivas o herbáceas, de dominio público o privado, que estén localizadas en áreas de topografía accidentada, en cabeceras de cuencas hidrográficas o en zonas que por sus condiciones climáticas, edáficas e hídricas no son aptas para la agricultura o la ganadería e indica que tienen como funciones son las de conservar el agua, el suelo, la flora y la fauna silvestre.

La declaratoria de bosques y vegetación protectores, serán autorizadas por el Ministerio del Ambiente quien previo informe, emitirá un Acuerdo e ingresará al

Sistema Nacional de Bosques y Vegetación Protectora. El artículo 20 del TULSMA regula las actividades permitidas dentro de los mismos.

El artículo 23 *ibídem* refiere a que la declaratoria de bosques y vegetación protectora, será de oficio o a petición de parte, y establece la guía interna para la declaratoria, tomando en como habilitantes los datos generales del área a ser declarada, las características ambientales, los aspectos físicos, el uso del suelo y su tipo de cobertura, documentos que acrediten la tenencia del área y el plan de manejo integral elaborado conforme a las normas vigentes.

2.2.8. Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC)

La Norma Ecuatoriana de la Construcción, publicada mediante Acuerdo Ministerial 47 del Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, en el Registro Oficial, Suplemento 413 de 10 de enero de 2015.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción, contempla los factores y requerimientos técnicos que deben ser usados para el diseño y construcción de edificaciones seguras. El Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda aprueba y oficializa el contenido nacional de las normas técnicas relacionadas con la seguridad estructural de las construcciones, y en base al régimen de competencias, les corresponde a los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales quienes tienen la obligación de emitir la normativa local de construcción, mediante ordenanzas apegadas a las disposiciones de las normas establecidas como parte de la NEC, basadas en la responsabilidad ambiental, desarrollando proyectos factibles y sostenibles que supongan bajo impacto ambiental.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Descripción del área de estudio

3.1.1. Ubicación

La cuenca hidrográfica del río Mira es una cuenca transfronteriza que se ubica al noroccidente de Ecuador y al sur occidente de Colombia (Gómez, Gallego y Naranjo, 2017). La presente investigación se centró en la parte de la cuenca que se encuentra en territorio ecuatoriano, entre las provincias de Imbabura, Carchi y Esmeraldas (Guerrero et al., 2019). El rango altitudinal de la cuenca oscila entre los 4 875 m s.n.m. hasta los 121 m s.n.m. El área de estudio tiene una superficie de 532 052.66 ha, y se encuentra delimitado al norte por la provincia del Carchi, al sur por la provincia de Pichincha, al este por el Oriente y al oeste por el occidente (Figura 1).

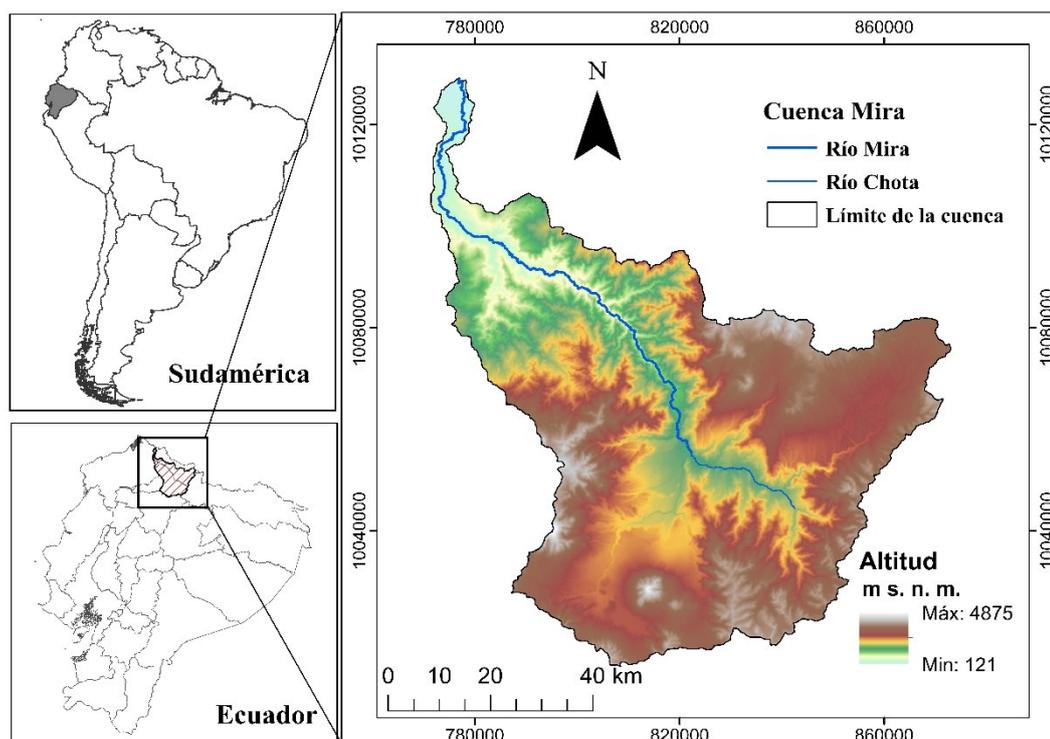


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Mira, Ecuador.

El área de estudio se delimita por las siguientes coordenadas (Tabla 1).

Tabla 1. Ubicación del área de estudio, Datum WGS 1984, Hemisferio Sur, Zona 17.

Puntos cardinales	Coordenadas	
	X	Y
Norte	776619	10129486
Sur	807182	10013346
Este	873198	10077162
Oeste	774907	10085475

3.1.2. Componentes biofísicos

- **Componente hidrológico**

El río Mira se origina en los páramos ecuatorianos, específicamente en el pajonal de la Reserva Ecológica El Ángel y en el nudo de Mojanda y Cajas (Gómez, Gallego y Naranjo, 2017). El sistema hídrico de la cuenca del río Mira recorre desde pajonales cruzando estepa espinosa, bosques húmedos y bosques de niebla, hasta desembocar en la selva lluviosa del territorio colombiano (Figura 2).

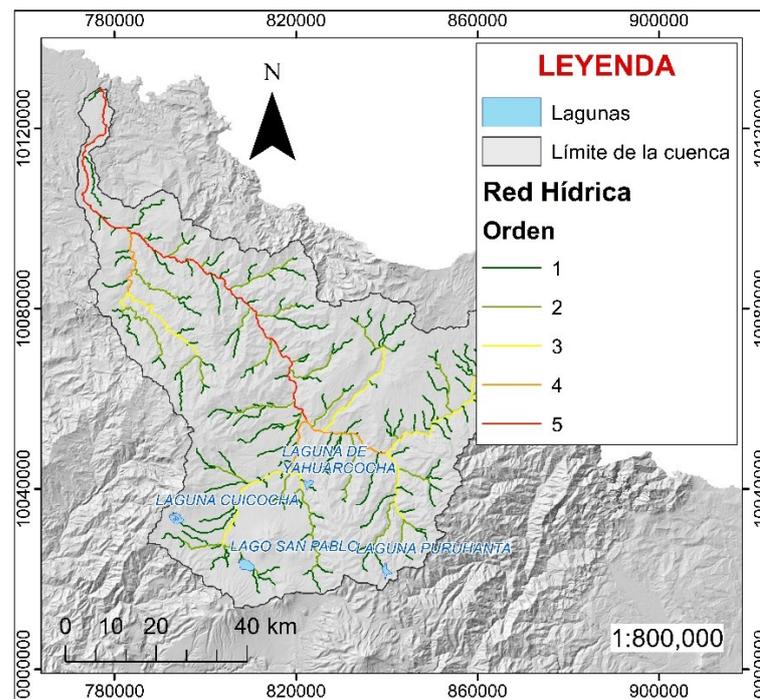


Figura 2. Orden hidrográfico del área de estudio.

Los principales afluentes del río Mira dentro del área de estudio de la presente investigación son (Tabla 2):

Tabla 2. Principales ríos del área de estudio.

Ríos	Longitud km
Mira	121.75
Chota	26.72
Ambi	41.72
Tahuando	30.86
El Ángel	26.43
Rumichaca o Apaquí	26.46
Lita	46.48
Palacara	21.04

Además, en la cuenca del río Mira es posible encontrar cuerpos de agua representativos como (Tabla 3):

Tabla 3. Cuerpos de agua en el área de estudio.

Lagos / Lagunas	Extensión ha
Yahuarcocha	239
Cuicocha	393
San Pablo	606
Puruhanta	272

- **Componente edáfico**

El relieve que presenta la cuenca es de laderas abruptas que empieza aproximadamente en los 4000 m s.n.m. en los páramos de El Ángel y El Nudo de Mojanda – Cajas (Figura 3). Los puntos más altos que se destacan dentro de la cuenca son: Cotacachi, Mirador, Cayambe e Imbabura (Endara, 2018).

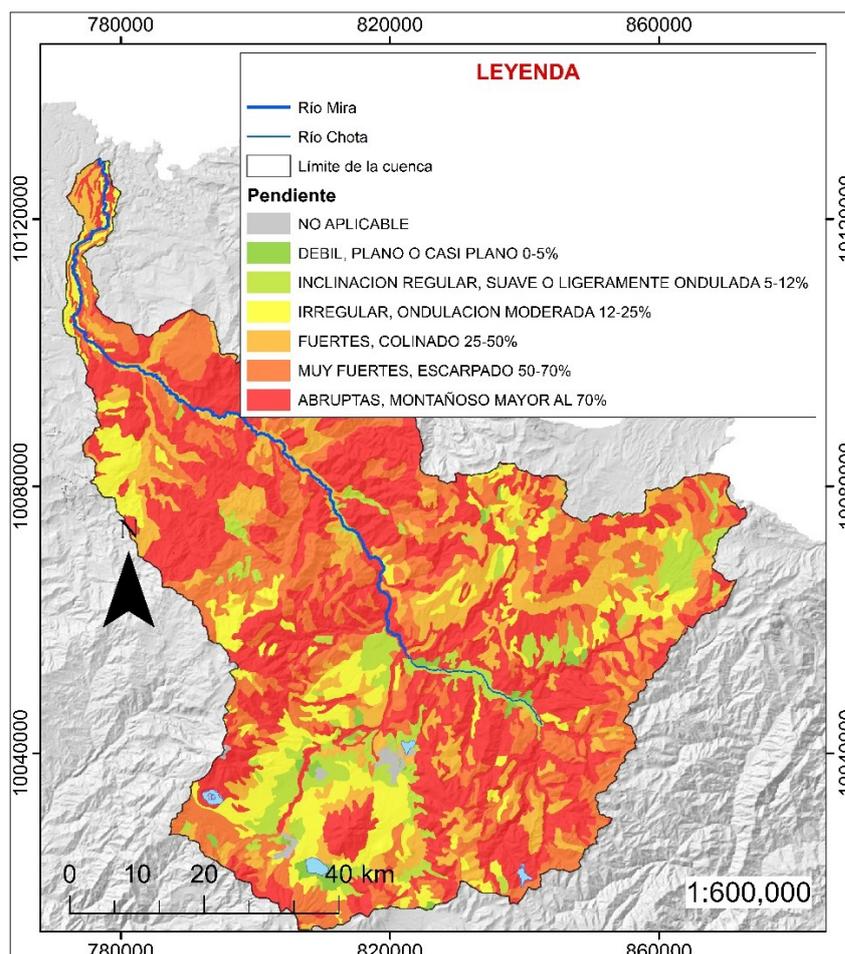


Figura 3. Pendientes del área de estudio.

La cuenca del río Mira es un área geográfica montañosa en toda su extensión, presenta montañas con pendientes mayor al 70% y representa el 40% del área de estudio (Tabla 4).

Tabla 4. Pendientes y porcentajes del área de estudio.

Pendiente	Área ha	%
Débil, plano o casi plano 0-5%	4 722.14	0.89
Inclinación regular, suave o ligeramente ondulado 5-12%	36 077.17	6.79
Irregular, ondulación moderada 12-25%	62 245.02	11.72
Fuertes, colinado 25-50%	83 844.43	15.78
Muy fuertes, escarpado 50-70%	124 743.56	23.48
Abruptas, montañoso mayor al 70%	215 497.61	40.57
No aplica	4 053.30	0.76
Total	53 1183.23	100

El área de estudio posee suelos entisoles, histosoles, inceptisoles y mollisoles (Figura 4). Los entisoles son suelos que menos evolucionan debido a que presentan poca o ninguna formación de horizontes edafogénicos, se encuentran en relieves montañosos que facilitan el proceso de erosión. Los inceptisoles son ligeramente más desarrollados que los entisoles y presentan características físicas y químicas muy variables (SIGTIERRAS, 2017). En la cuenca del río Mira los inceptisoles tienen una gran distribución geográfica, siendo los más representativos, ocupando 267 964 ha que representa un 40% del área cartografiada. La parte occidental de la cuenca hidrográfica presenta suelos de origen volcánico, que al ser usados por actividades antrópicas son de fácil meteorización debido a su alta capacidad hidratable del sustrato (Guerrero et al., 2019).

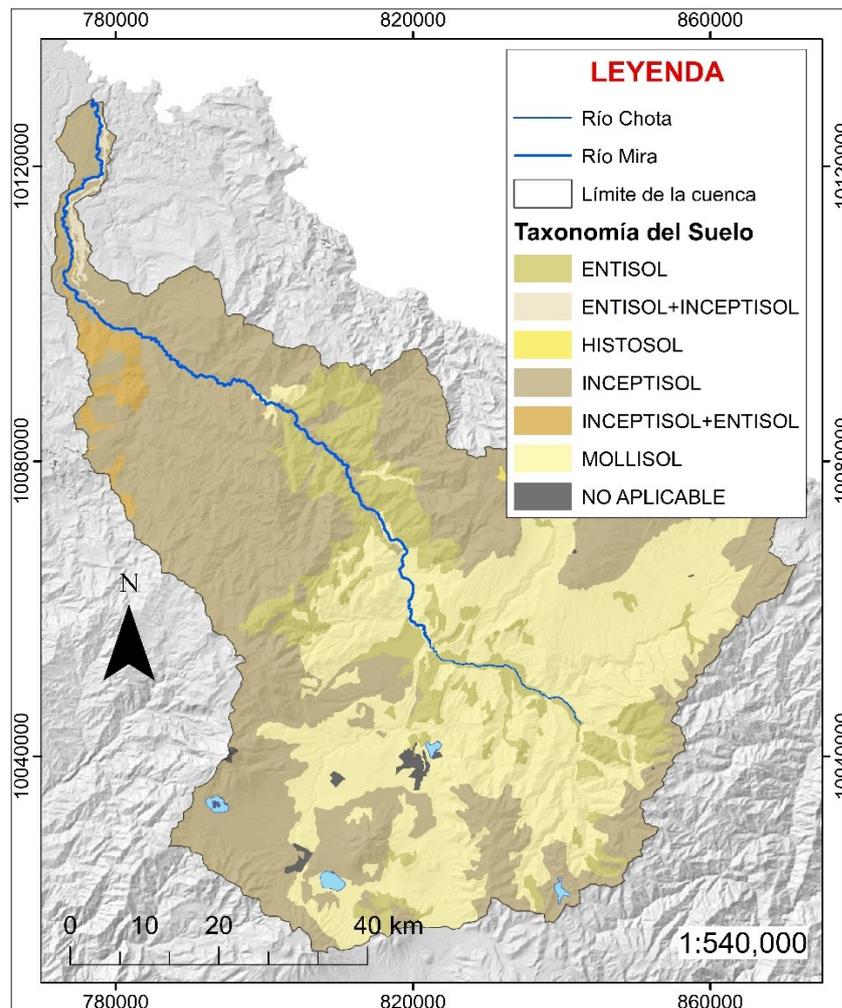


Figura 4. Taxonomía del suelo del área de estudio.

- **Componente climatológico**

La mayor parte de la cuenca hidrográfica se encuentra en la región sierra norte del Ecuador, lo que su ubicación hace que los vientos Alisios que vienen del oriente y las masas de aire del océano Pacífico modelen el clima y sea de selva tropical y de sabana intermontañosa (Guerrero et al., 2019; Endara, 2018). La precipitación de la cuenca del río Mira varía a lo largo y ancho del territorio, la precipitación es desde los 466 mm hasta los 6 000 mm y la profundidad de la precipitación anual media es de 1 473 mm (Endara, 2018).

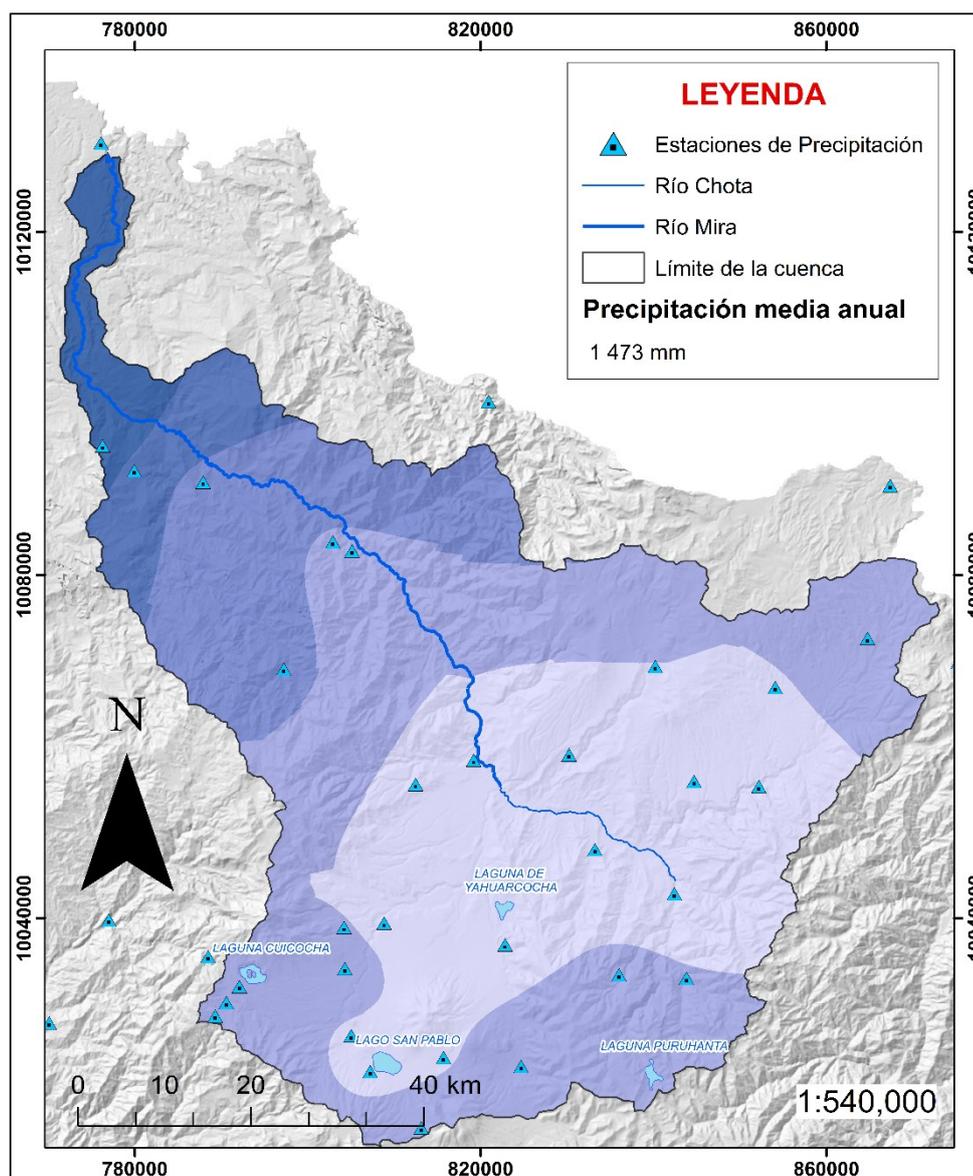


Figura 5. Precipitación media anual del área de estudio.

La geografía de la cuenca determina diferentes tipos de climas, en las partes altas predominan los páramos y en las partes bajas los bosques tropicales (Gómez, Gallego y Naranjo, 2017). En ese contexto, la altitud es un componente que define la precipitación y por ende la temperatura. El área de estudio posee una temperatura que oscila desde los 2 °C en las partes altas hasta los 26 °C en las partes bajas (Figura 6).

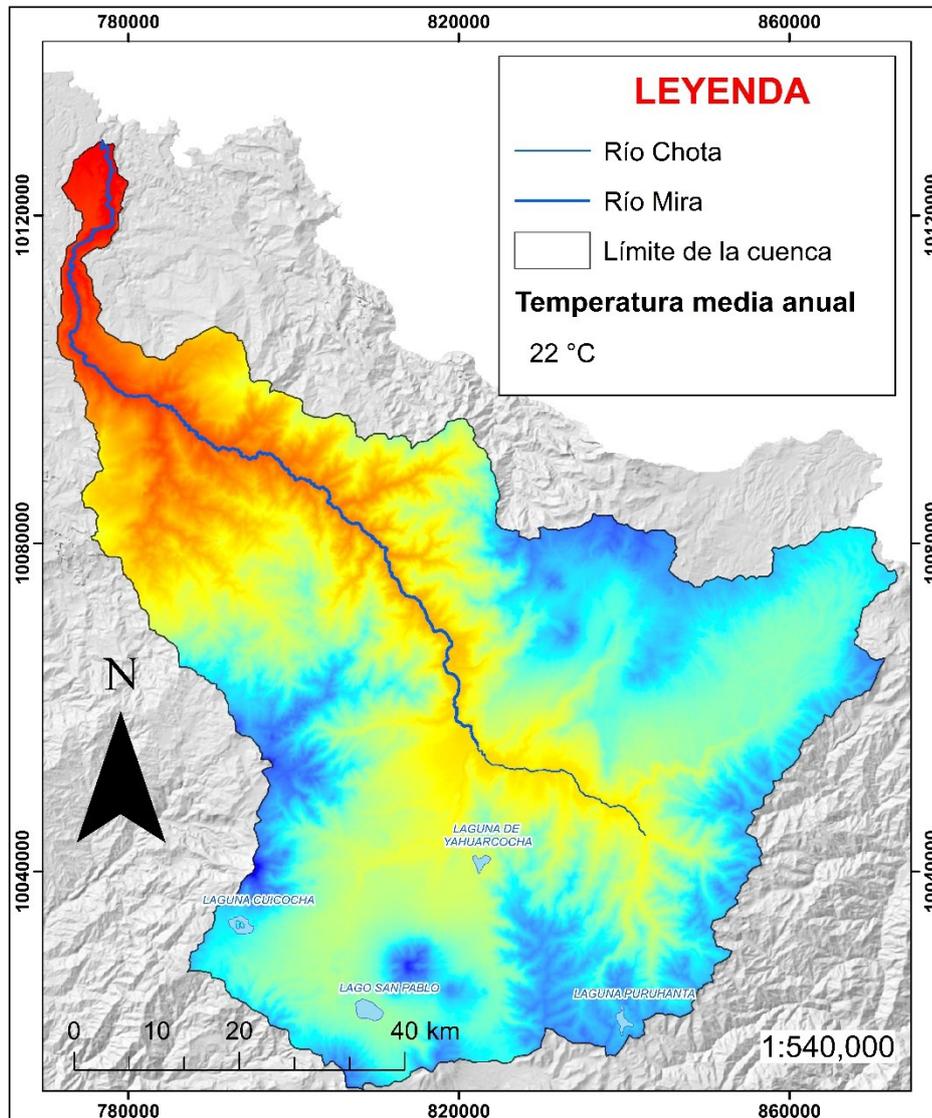


Figura 6. Temperatura media anual del área de estudio.

- **Componente biológico**

La cuenca hidrográfica del río Mira posee 13 zonas de vida que se distribuyen geográficamente en toda la cuenca, presenta estepas espinosas, bosques húmedos, bosques tropicales y páramos (Figura 7). En la parte alta, el ecosistema

predominante es el páramo donde la especie más representativa de la flora es *Calamagrostis spp* y *Espeletia pycnophylla*. En cuanto a la fauna, se registran especies en peligro de extinción como: *Tremarctos ornatus* y *Odocoileus virginianus* (MAE, 2015). En la parte media, las principales zonas de vida son: la estepa espinosa y el bosque seco, en esta zona están asentadas las principales ciudades que tiene la cuenca. Finalmente, en la parte baja existe bosque pluvial donde la flora y fauna es más variada en comparación a la zona alta y media (Gómez, Gallego y Naranjo, 2017).

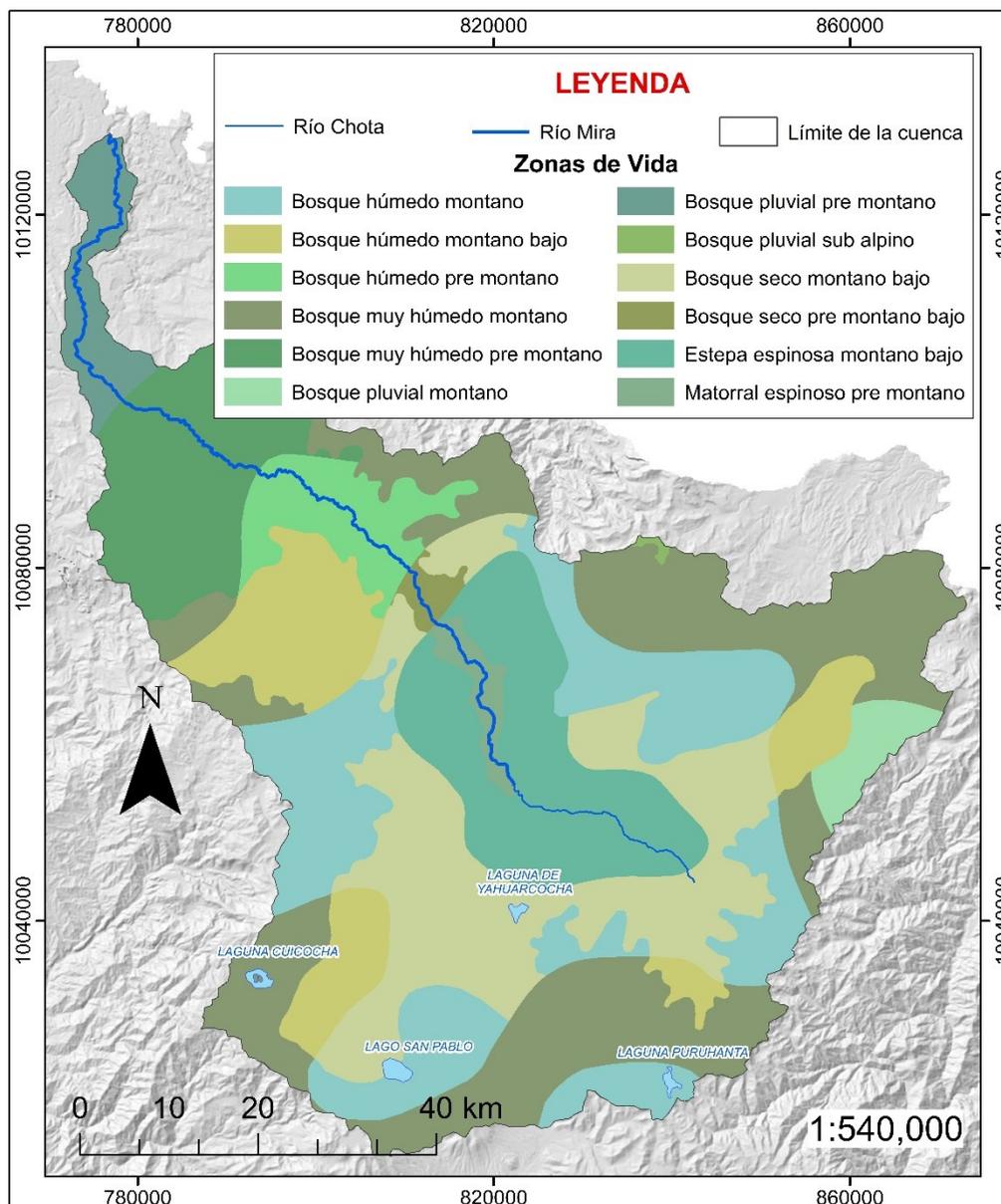


Figura 7. Zonas de vida de la cuenca del río Mira.

3.1.3. Componente demográfico

La cuenca del río Mira está conformada por 13 cantones los cuales se distribuyen geográficamente, el cantón con mayor cantidad de habitantes es Ibarra con 221 149 personas. Seguido de los cantones Otavalo y Tulcán con 125 785 y 102 395 personas respectivamente (Tabla 5).

Tabla 5. Cantidad de población por cantones hasta el año 2020.

Provincia	Cantones	Población
Imbabura	Ibarra	221 149
	Otavalo	125 785
	Antonio Ante	54 311
	Urcuqui	17 540
	Pimampiro	13 269
	Cotacachi	44 203
Carchi	Tulcán	102 395
	Bolívar	15 528
	Montufar	34 229
	Huaca	8931
	Espejo	13 817
	Mira	11 969
Esmeraldas	San Lorenzo	62 772

Actualmente, la cuenca se encuentra habitada por diferentes grupos poblacionales: afrodescendientes, indígenas y mestizos. El pueblo Awá se distribuye en el límite provincial de las provincias Carchi, Imbabura y Esmeraldas (Figura 8). Viven en poblados pequeños y dispersos en la montaña. La comunidad afrodescendiente se distribuye específicamente en el Valle del Chota, límite provincial entre Carchi e Imbabura. El pueblo Otavalo se encuentra distribuido en la parte alta de la cuenca en los cantones de Otavalo, Cotacachi, San Antonio e Ibarra. Su alimentación tradicional se basa en el mote, el maíz, tubérculos como la papa, el melloco. Las

comunidades campesinas se encuentran en Lita, Ibarra, Otavalo, Mira, Bolívar, Espejo y Pimampiro, provienen de otras zonas del territorio nacional y se dedicaron a la ganadería y agricultura (Gómez, Gallego y Naranjo, 2017).

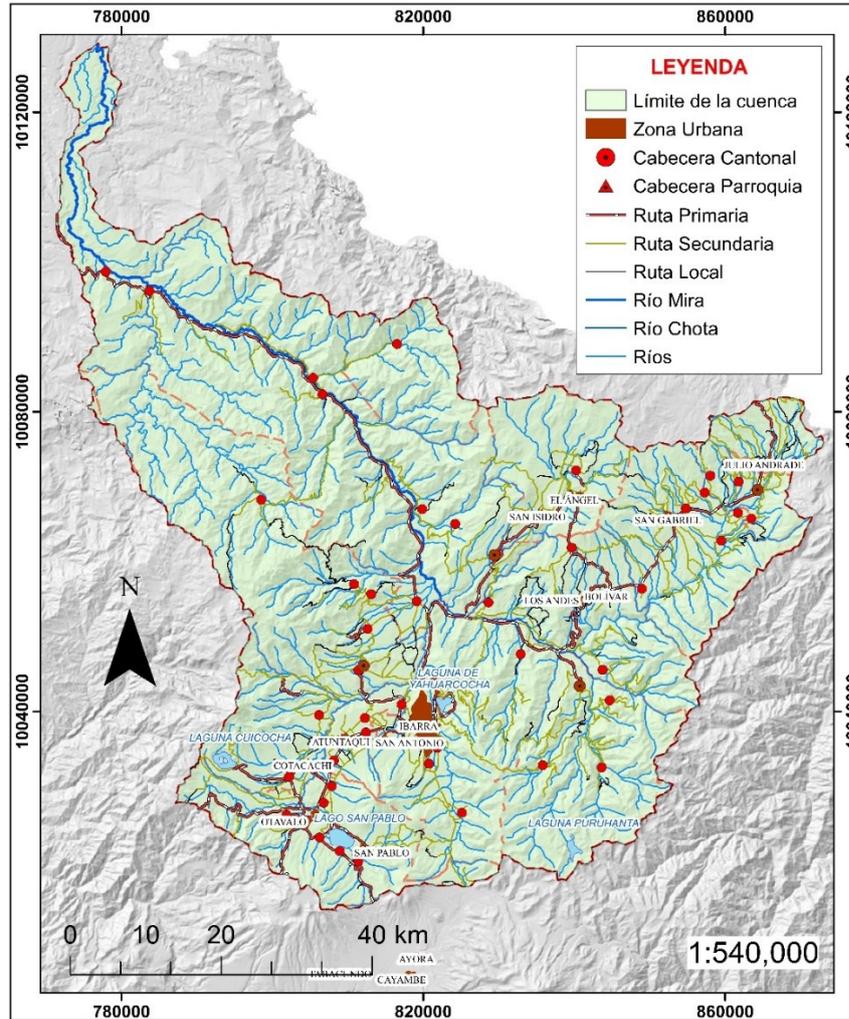


Figura 8. Mapa político de la cuenca del río Mira.

3.2. Limitaciones

Para la determinación de la proyección del CUS para el año 2100, se encontró una limitante para su elaboración, debido a que los análisis de los modelos de proyección deben tener el mismo tiempo de estudio en el pasado que del futuro. Es decir, si estudiamos un periodo de tiempo de 10 años, podemos predecir lo que pasará en los siguientes 10 años del periodo (Jiménez-Moreno, 2007; Eastman, 2003). El software Terrset 1.0 realiza el análisis de predicción fuera del intervalo de tiempo verdadero. Sin embargo, los resultados son estarán expuestos a errores..

3.3. Métodos

Dado que el objetivo de la presente investigación fue evaluar el cambio de uso del suelo de la cuenca del río Mira para el período 1996-2100, se recurrió a un diseño no experimental, que se aplicó de manera longitudinal, considerando que el tema de investigación buscó analizar cambios a través del tiempo (Hernández, Fernández y Baptista, 2017). La presente investigación fue diseñada bajo el planteamiento metodológico del enfoque cuantitativo, puesto que este es el que mejor se adaptó a las características y necesidades del estudio.

La metodología de la presente investigación se dividió en 3 etapas con respecto a la cantidad de objetivos. Es decir, para cada etapa se realizó el desarrollo de un objetivo (Figura 9).

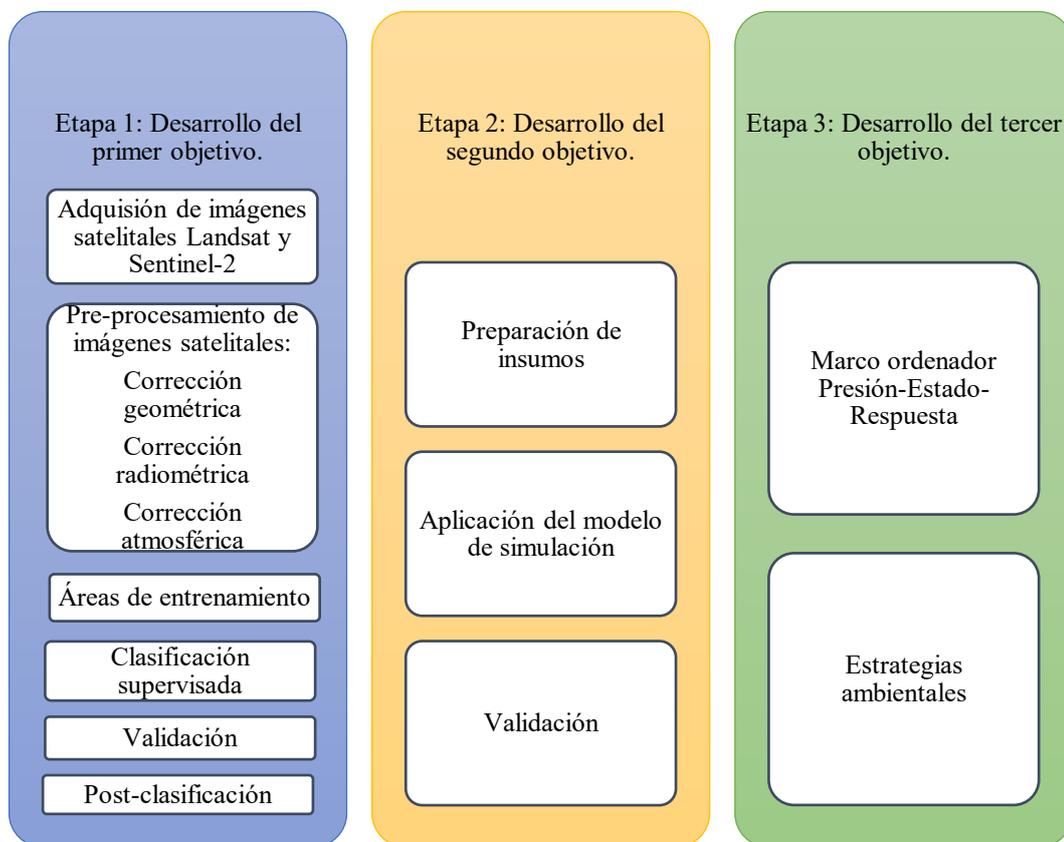


Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología utilizada en este estudio.

3.2.1. Etapa 1. Determinación del cambio de cobertura y uso del suelo en la cuenca del río Mira para el período 1996 - 2018

3.2.1.1. Adquisición de imágenes satelitales

Para la determinación del cambio de cobertura y uso del suelo se generaron mapas temáticos a partir de imágenes satelitales Landsat y Sentinel con una resolución de 30 m y 20 m, respectivamente. En ese sentido, se utilizó el portal web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) para la descarga de imágenes de 1996 y 2007, donde se utilizó el sensor Landsat 5 TM C1 Level-1 y el sensor Landsat 7 ETM+ respectivamente. Para el 2018 el sensor Sentinel-2 MSI. Posteriormente, se utilizó el software ArcGIS 10.4 para realizar el resamplado de la imagen del sensor Sentinel-2, con el fin de aumentar de tamaño del pixel a 30 m.

Tabla 6. Características de las imágenes satelitales.

Satélite	Banda	Sensor	Longitud de onda (µm)	Resolución (m)
Landsat 5	1	TM	0.45 – 0.52	30
	2		0.52 – 0.60	30
	3		0.63 – 0.69	30
	4		0.76 – 0.90	30
	5		1.55 – 1.75	30
	6		10.4 – 12.5	120
	7		2.08 – 2.35	30
Landsat 7	1	ETM +	0.45-0.52	30
	2		0.52-0.60	30
	3		0.63-0.69	30
	4		0.76-0.90	30
	5		1.55-1.75	30
	6		10.42-12.50	60
	7		2.08-2.35	30
	8		0.52 – 0.90	15
Sentinel-2	1	MSI	0.43 – 0.45	60
	2		0.45 – 0.52	10
	3		0.54 – 0.57	10
	4		0.65 – 0.68	10
	5		0.69 – 0.71	20
	6		0.73 – 0.74	20
	7		0.77 – 0.79	20
	8		0.78 – 0.90	10
	8 A		0.85 – 0.87	20

9	0.93 – 0.95	60
10	1.36 – 1.39	60
11	1.56 – 1.65	20
12	2.10 – 2.28	20

3.2.1.2. Pre-procesamiento de imágenes satelitales

Para la corrección de distorsiones de las imágenes satelitales, se utilizó el software ENVI 5.3, con el cual se realizó correcciones geométricas, radiométricas y atmosféricas.

- **Corrección geométrica**

Este proceso corrige los desplazamientos y distorsiones geométricas de la imagen, causados por la influencia del relieve y errores sistemáticos asociados. En ese contexto, el proceso consistió en posicionar las imágenes satelitales en la zona territorial adecuada al área de estudio. Se utilizó el sistema de coordenadas UTM con punto de referencia WGS84, Zona 17, Hemisferio Sur.

- **Corrección radiométrica**

Las distorsiones radiométricas obedecen a mecanismos que alteran los valores del brillo de los píxeles y se deben fundamentalmente a interferencias atmosféricas y de iluminación. En ese sentido, se convirtió la información de la imagen original, de Niveles Digitales (ND) a Niveles de Reflectancia (Ecuación 1).

$$L\lambda = G * ND * B \quad (1)$$

Donde;

$L\lambda$ = radiancia espectral obtenida por el sensor ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)

ND = niveles digitales de la imagen

G = ganancia, y

$B = \text{sesgo}$

- **Corrección atmosférica**

Para la eliminación de nubes y neblina presentes en las imágenes, se empleó la corrección atmosférica, el cual consistió en la determinación de transmisividad atmosférica entre el sol y la tierra (Ecuación 2).

$$\rho = \frac{\pi * [L - L_a] * d^2}{\cos \theta * E_0 * \tau_1 * \tau_2} \quad (2)$$

Donde;

$\rho = \text{reflectividad}$

$E_0 = \text{irradiancia exoatmosférica solar } (W \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1})$

$\tau_1 = \text{coeficiente de transmisión atmosférica en el camino Sol-Tierra}$

$\tau_2 = \text{coeficiente de transmisión atmosférica en el camino Tierra-sensor}$

$L_a = \text{radiancia recibida por el sensor en un área donde sólo hay contribución de la atmósfera (área de sombra o agua según la región espectral)}$

$L = \text{radiancia del píxel a corregir}$

$\iota = \text{ángulo cenital solar, y}$

$d = \text{distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas}$

3.2.1.3. Áreas de entrenamiento

Se establecieron 7 categorías de coberturas y usos del suelo, se realizó la unión de las categorías de cultivos y pastos, puesto que los colores de los pixeles fueron similares (Tabla 7).

Tabla 7. Categorías de coberturas y usos del suelo.

Número	Descripción	Abreviaturas
1	Bosque	BO
2	Cuerpos de agua	CDA
3	Cultivos y Pastos	CU
4	Páramo	PA
5	Vegetación arbustiva	VA
6	Área sin vegetación	ASV
7	Zona urbana	ZU

Para el establecimiento de áreas de entrenamiento, se determinó el tamaño muestral representativo del área de estudio, con un nivel de confianza del 90 % (Tabla 8).

Tabla 8. Análisis estadístico para la determinación de la muestra.

Campo estadístico	Descripción
Total de la población (N)	5311840000 m ²
Nivel de confianza	90 %
Precisión	10 %
Proporción	50 %
Tamaño muestral	68
Proporción esperada de pérdidas	30 %
Muestra ajustada a las pérdidas	97
Total (Muestra y validación)	194

Un total de 194 cuadrantes fueron colectados de 30 x 30 m; mediante el instrumento Garmin GPSMAP 64 (Figura 10). Se seleccionó de forma aleatoria 97 cuadrantes para ser utilizados en el algoritmo de clasificación, los restantes 97 cuadrantes fueron utilizados para la validación de la clasificación.

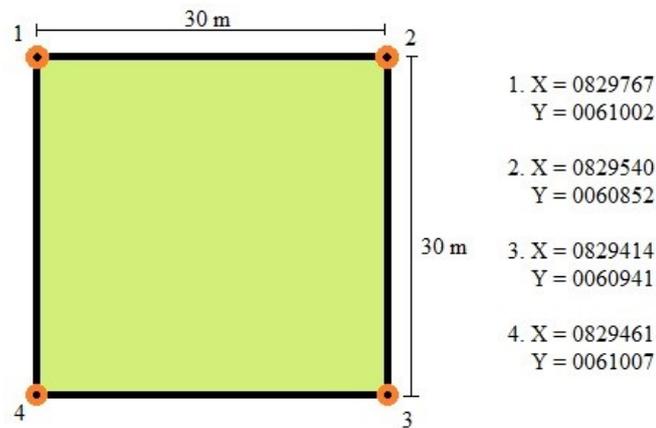


Figura 10. Área de entrenamiento en campo (Cuadrante).

3.2.1.4. Clasificación supervisada

Para la obtención de polígonos digitalizados con las categorías de coberturas y usos del suelo identificados, se empleó el clasificador de máxima probabilidad debido a que es un algoritmo paramétrico que asume la distribución estadística gaussiana para las categorías identificadas (Ecuación 3).

$$g_1(x) = -\ln|\Sigma_i| - (x - in_i)^t \Sigma_i^{-1} (x - in_i) \quad (3)$$

3.2.1.5. Validación

Para la validación del desempeño del algoritmo usado en la clasificación supervisada, se realizó una matriz de confusión con las categorías clasificadas y los

97 cuadrantes reservados para este proceso. Se utilizó la escala de valoración del coeficiente de Kappa para estimar la efectividad del modelo (Tabla 9).

Tabla 9. Valoración del coeficiente Kappa.

Coeficiente kappa	Fuerza de concordancia
0.00	Pobre (<i>Poor</i>)
0.01 – 0.20	Leve (<i>Slight</i>)
0.21 – 0.40	Aceptable (<i>Fair</i>)
0.41 – 0.60	Moderada (<i>Moderate</i>)
0.61 – 0.80	Considerable (<i>Substantial</i>)
0.81 – 1.00	Casi perfecta (<i>Almost perfect</i>)

Fuente: Landis y Koch (1977).

3.2.1.6. Post-clasificación

Se corrigió mediante fotointerpretación manual las categorías que el algoritmo clasificó incorrectamente. Finalmente, se creó un mapa temático con las coberturas y usos del suelo de las imágenes analizadas.

3.3.1.7. Determinación del cambio de uso de suelo

Para determinar el cambio de cobertura y uso del suelo, se calculó las superficies de los tipos de coberturas y uso del suelo de los años 1996, 2007 y 2018. También, se procedió a cartografiar los períodos de tiempo mencionados con el fin de representar de manera gráfica el cambio.

3.2.2. Etapa 2. Proyección de dos escenarios explicativos del cambio de uso del suelo para los años 2037 y 2100

3.2.2.1. Preparación de insumos

Para la obtención de escenarios futuros del cambio de cobertura y uso del suelo, se realizó la estandarización de características de los rasters de categorías de coberturas y usos del suelo (Tabla 10).

Tabla 10. Características de los rasters usados en el Terrset.

Información del raster	Características
Columnas y filas	3394 y 3927
Número de bandas	1
Tamaño del pixel	30 m x 30 m
Formato	TIFF
Tipo de pixel	Unsigned integer
Fondo del pixel	8 bit

Se identificaron variables y criterios que aportaron en la modelación de los escenarios futuros a los que se clasificó en variables estáticas y variables dinámicas (Figura 11). Las variables tuvieron las mismas características de los rasters de categorías de cobertura y uso del suelo para poder sido considerados en la modelación.

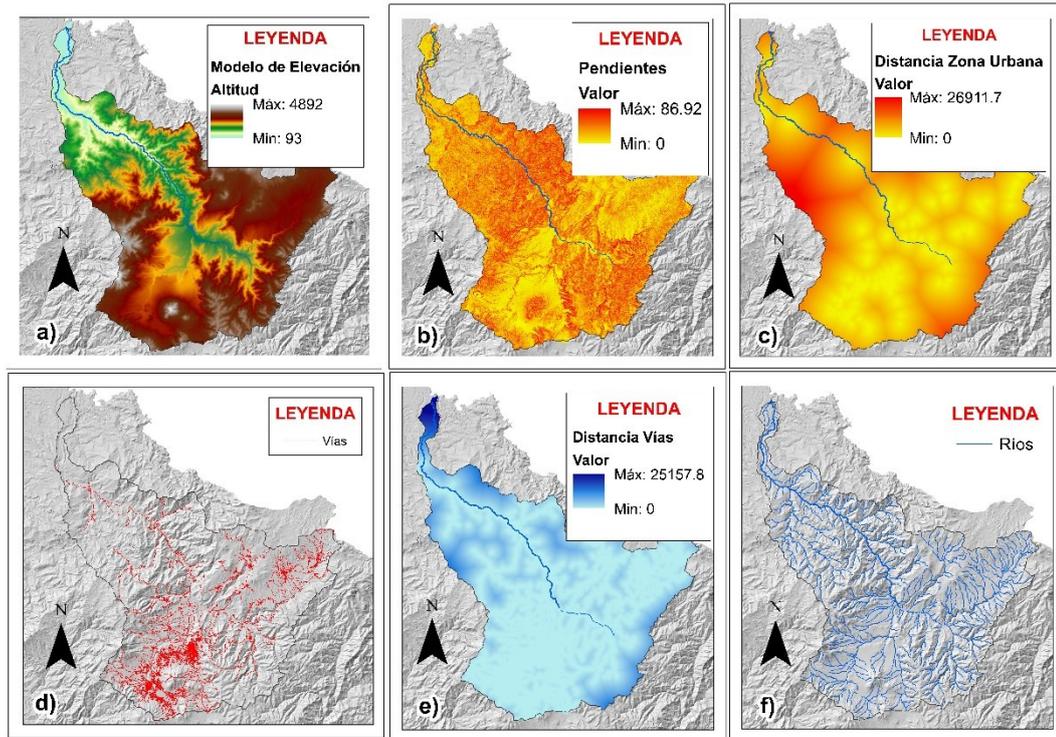


Figura 11. Variables estáticas: a) Modelo de Elevación, b) Pendientes, d) Vías y f) Ríos. Variables dinámicas: c) Distancia Euclidiana Zona Urbana y e) Distancia Euclidiana Vías.

Posteriormente, se identificó áreas protegidas por leyes ambientales vigentes y se utilizó como variable de restricción en el modelamiento. Es decir, el software no analizó cambios de cobertura y uso del suelo dentro de las áreas protegidas y mantuvo la clasificación inicial. Se consideró las categorías del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), Programa Socio-Bosque y Bosques Protectores (Figura 12). Se consideró a las áreas protegidas como restricción porque al estar amparadas por la ley ambiental vigente no deben tener cambio de uso del suelo, al contrario, debe enriquecerse en el tiempo.

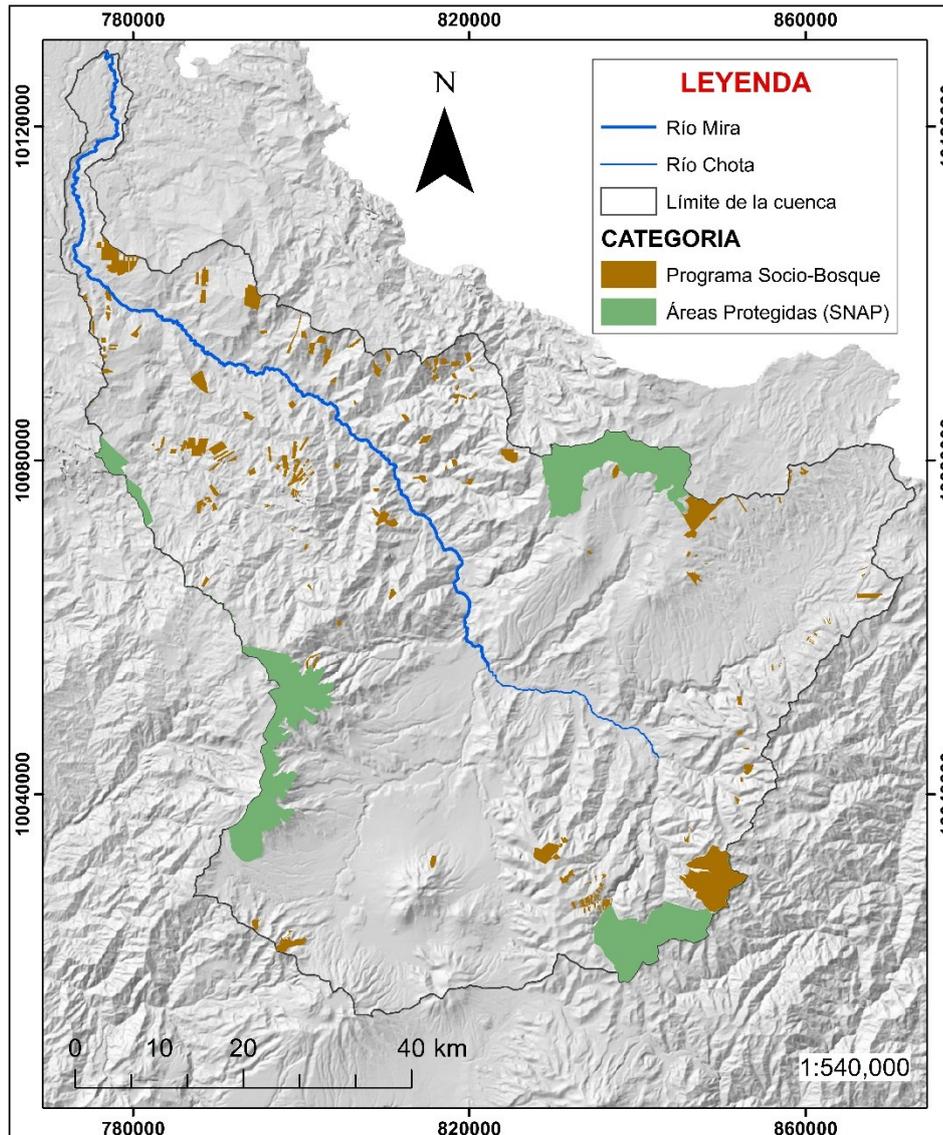


Figura 12. Variable de restricción de CUS del área de estudio.

3.2.2.2. Aplicación del modelo de simulación del cambio de cobertura y uso del suelo para el año 2037

Para la determinación del cambio de cobertura y uso del suelo para el año 2037, se utilizó el algoritmo Land Change Model (LCM) a través del software Terrset 1.0. Primero, se realizó un análisis de los cambios de cobertura y usos del suelo, en el cual se observó las áreas donde se produjeron principalmente cambios dentro del área de estudio. Segundo, se generó tendencias de cambio entre categorías de coberturas y usos del suelo que se identificaron en el análisis de cambios (Figura 13).

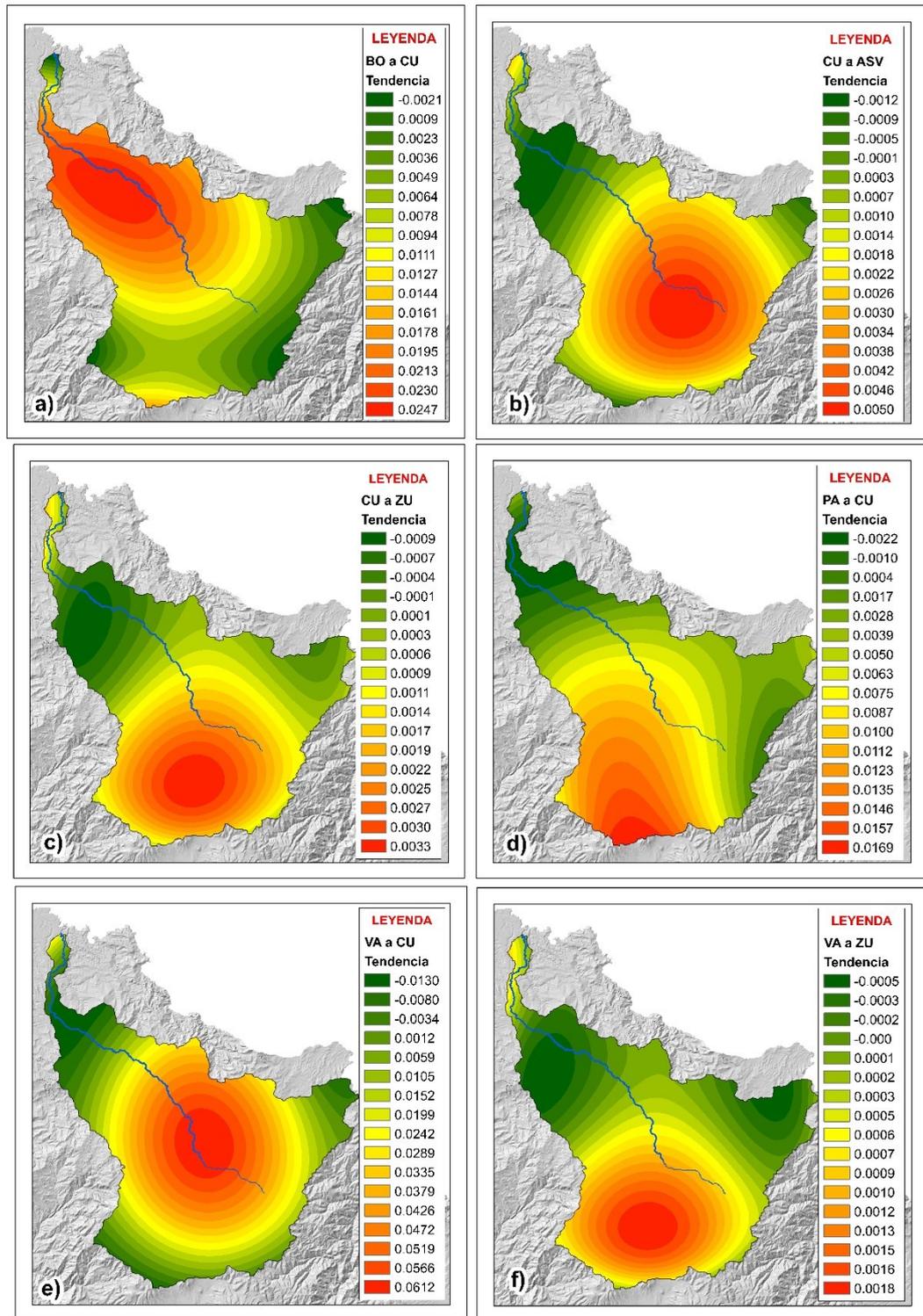


Figura 13. Tendencias de cambio: a) Bosque a Cultivos, b) Cultivos a Áreas sin Vegetación, c) Cultivos a Zonas Urbanas, d) Páramos a Cultivos, e) Vegetación Arbustiva a Cultivos y f) Vegetación Arbustiva a Zonas Urbanas.

Tercero, se definió el sub-modelo de transición y se determinó las áreas que mutaron de estado (Tabla 11).

Tabla 11. Transiciones del sub-modelo Disturbios.

Transición		Nombre del sub-modelo
De:	A:	
Cultivos	Áreas sin Vegetación	Disturbios
Bosques	Cultivos	
Páramos	Cultivos	
Vegetación Arbustiva	Cultivos	
Cultivos	Zonas Urbanas	
Vegetación Arbustiva	Zonas Urbanas	

Cuarto, se incorporó variables estáticas y dinámicas para mayor exactitud del modelo. Para seleccionar las variables que intervinieron en el modelo de transición, se realizó la prueba Cramer's V, test de correlación que permite calcular la fuerza de relación entre variables (Tabla 12).

Tabla 12. Análisis del test de Cramer's V.

Variables	Test Cramer's V	P Valor
Modelo de elevación	0.4716	0
Pendiente	0.3778	0
Distancia euclidiana de Zonas Urbanas	0.2883	0
Distancia euclidiana de Vías	0.3778	0
Cultivos a Áreas sin Vegetación	0.3320	0
Bosques a Cultivos	0.2821	0
Páramos a Cultivos	0.2810	0
Vegetación Arbustiva a Cultivos	0.2943	0
Cultivos a Zonas Urbanas	0.3030	0
Vegetación Arbustiva a Zonas Urbanas	0.2600	0

Quinto, se empleó el algoritmo perceptrón multicapa (MLP) para el cálculo de la transición potencial. Sexto, se realizó la simulación de cambios de coberturas y usos

del suelo para el año 2018 con la restricción sin cambio en las áreas protegidas. Posteriormente, se validó el modelo proyectado con el modelo clasificado en campo del 2018. Finalmente, se realizó la simulación con los rasters 1996 y el 2018 proyectado para la obtención del escenario futuro para el año 2037 y se empleó el algoritmo Markov.

$$\begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{ln} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} P_{ij} \geq 0, \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1, i = 1, \dots, n \quad (4)$$

3.2.2. Etapa 3. Análisis de los cambios en las categorías de uso del suelo con el fin de proponer estrategias de ordenamiento territorial

Para la propuesta de estrategias de ordenamiento territorial, se realizó el mapa temático de disturbios para el periodo 1996-2018, el cual se ejecutó mediante la intersección del año inicial y el año final. Se utilizó el indicador de desarrollo sostenible en el marco ordenador Presión-Estado-Respuesta (OCDE, 1993). En ese sentido, se empleó el principio de casualidad donde las actividades humanas ejercen presión al ambiente y cambian la calidad y cantidad de los recursos naturales (Rodríguez, 2004 y OCDE, 1993). De tal modo, la sociedad responde a estos cambios a través de estrategias ambientales, políticas y económicas (Figura 14).

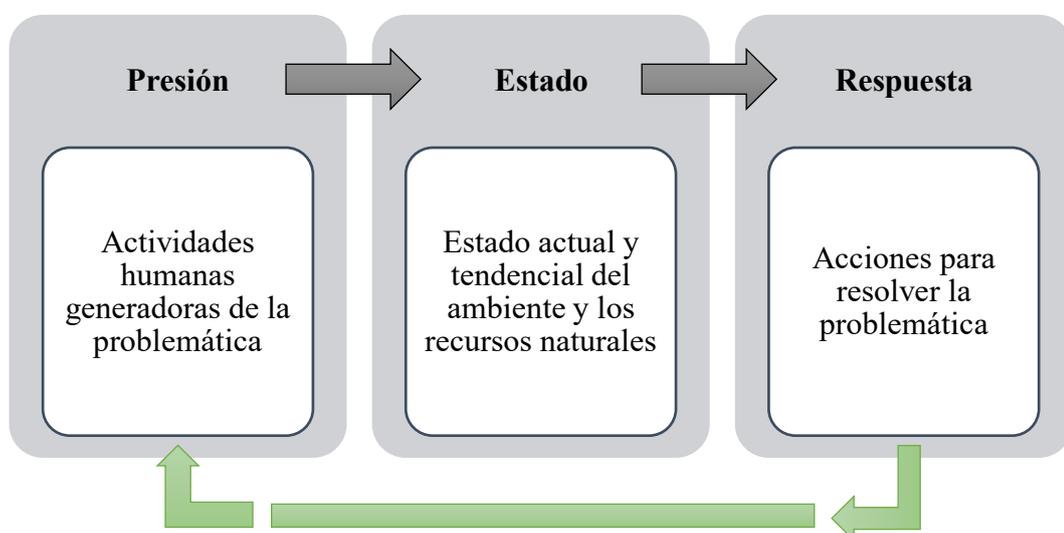


Figura 14. Marco Presión-Estado-Respuesta con base en OCDE (1993).

3.4. Materiales y equipos

A continuación, se detallan los materiales, equipos y softwares que se usaron en la presente investigación (Tabla 13).

Tabla 13. Materiales, Equipos y Softwares utilizados en el estudio.

Tipo	Descripción
Materiales	Libreta de campo Imágenes satelitales Landsat Archivos shapefiles del SNI (Sistema Nacional de Información) Bibliografía de la cuenca del Río Mira
Equipos	Computadora portátil Navegador GPS Cámara fotográfica Drone Transporte
Software	ArcMap 10.4 licencia temporal ENVI 5.3 licencia temporal TerrSet 1.0 licencia temporal

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta el análisis del cambio de uso del suelo en la cuenca del río Mira para el periodo 1996 – 2037. Del mismo modo, se describe las actividades que se deben aplicar para evitar el CUS.

4.1. Cambio de cobertura y uso del suelo para el período 1996 – 2018

Según las clasificaciones supervisadas realizadas a las imágenes satelitales de los años 1996, 2007 y 2018, se observó que existen cambios en el tamaño de las superficies de las categorías de coberturas y usos del suelo en el área de estudio. El bosque disminuye 8% en los 22 años analizados, mientras que los cultivos y pastos aumentaron el 10%. (Tabla 14).

Tabla 14. Superficies de las coberturas y usos del suelo del área de estudio de los años 1996, 2007 y 2018.

Coberturas y Usos del Suelo	1996		2007		2018	
	ha	%	ha	%	ha	%
Área sin Vegetación	4794.60	1	8071.25	2	15 222.42	3
Bosque	196 499.70	37	172 004.58	32	155 100.99	29
Cuerpos de Agua	1640.98	0.3	1637.25	0.3	1637.03	0.3
Cultivos y Pastos	143 886.32	27	173 797.96	33	197 400.53	37
Páramo	66 936.54	13	58 972.18	11	55 926.84	11
Vegetación Arbustiva	114 245.63	21	112 432.35	21	100 537.80	19
Zona Urbana	4048.90	1	5137.09	1	6227.05	1
Total	532 052.66	100	532 052.66	100	532 052.66	100

El área sin vegetación durante el período 1996 – 2018 ha ido en aumento, en el año 2018 se registró 15 222.42 ha, tres veces más que el resultado registrado en el año inicial. El aumento de la zona urbana es lento en el periodo estudiado, pasó de 4048.90 ha en el año 1996 a 6227.05 ha para el 2018, en la comparación porcentual respecto al total de la superficie de la cuenca no superó el 1%. El análisis gráfico de la cobertura y uso del suelo para los años 1996, 2007 y 2018, mostró que la categoría de cultivos y pastos es la que mayor aumenta, mientras que el bosque disminuyó en la parte media – baja de la cuenca (Figura 15).

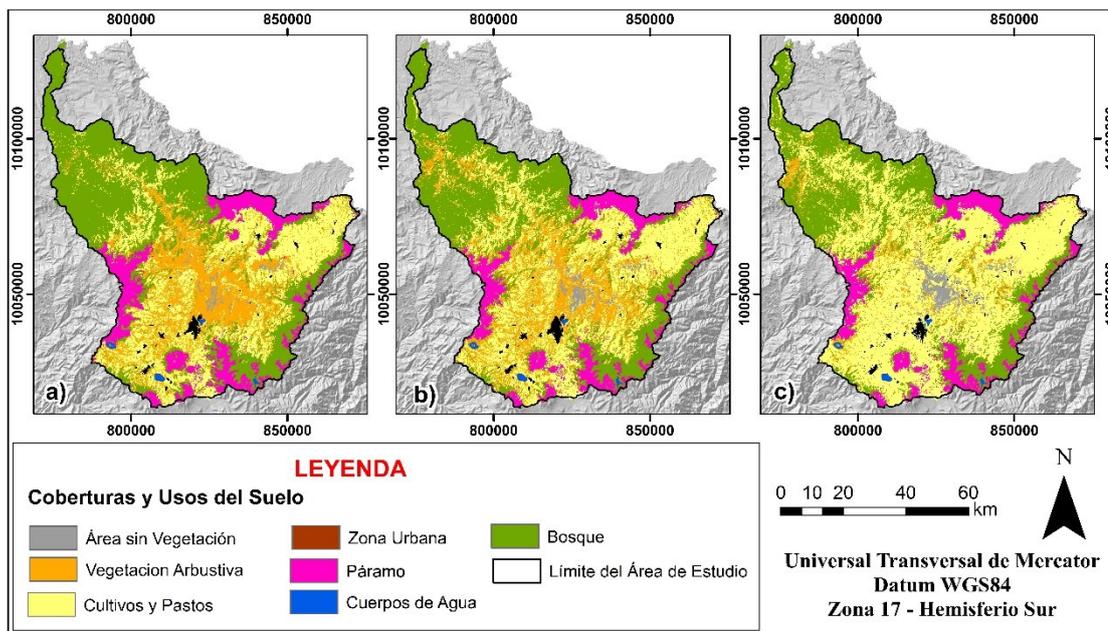


Figura 15. Mapas de cobertura y uso del suelo de la cuenca del río Mira. a) 1996, b) 2007 y c) 2018.

Según el análisis de la matriz de transición, se determinó el porcentaje de aumento y disminución de cada categoría de cobertura y uso del suelo para el periodo 1996 – 2018. El cambio neto registrado para el bosque fue de -6.15%. Es decir, el bosque disminuyó su superficie debido a actividades antrópicas. Del mismo modo, el páramo registró disminución del -2.31% de cambio neto. La zona urbana registró un aumento ligero de 0.21% de cambio neto. Los cuerpos de agua no registraron variación debido a que las imágenes utilizadas fueron de resolución de 30 x 30 m y para este tipo de análisis es recomendable utilizar imágenes satelitales de mejor resolución (Tabla 15).

Tabla 15. Aumento y disminución del cambio de cobertura y uso del suelo para el periodo 1996-2018.

1996/2018	Pérdida %	Ganancia %	Cambio total %	Swat %	Cambio neto %
Área sin Vegetación	0.44	0.69	1.13	0.88	0.25
Bosque	6.24	0.09	6.33	12.48	-6.15
Cuerpos de Agua	0	0	0	0	0
Cultivos y Pastos	0.6	8.74	9.34	1.19	8.15
Páramo	2.33	0.02	2.35	4.66	-2.31
Vegetación Arbustiva	3.67	3.53	7.2	7.34	-0.14

Zona Urbana	0	0.21	0.21	0	0.21
-------------	---	------	------	---	------

Según los polígonos de control registrados en campo y la clasificación supervisada de las coberturas y usos del suelo para el periodo 1996 – 2018, el coeficiente de Kappa fue de 0.89 equivalente al 90.33% de precisión.

Tabla 16. Matriz de validación del modelo 2018 con los puntos de control registrados en campo.

Truth data / Classifier results	Área sin Vegetación	Bosque	Cuerpos de Agua	Cultivos y Pastos	Páramo	Vegetación Arbustiva	Zona Urbana	Classification overall	Producer Accuracy %
Área sin Vegetación	8	0	0	0	0	0	0	8	100
Bosque	0	7	0	0	1	0	0	8	87.5
Cuerpos de Agua	0	0	9	2	0	1	0	12	75
Cultivos y Pastos	0	0	0	7	0	0	0	7	100
Páramo	0	2	0	0	8	0	0	10	80
Vegetación Arbustiva	0	0	0	0	0	8	0	8	100
Zona Urbana	0	0	0	0	0	0	9	9	100
Truth overall	8	9	9	9	9	9	9	62	
User Accuracy %	100	77.78	100	77.78	88.89	88.89	100		
Overall accuracy %	90.33								
Kappa	0.89								

4.2. Proyección de dos escenarios explicativos del cambio de uso del suelo para los años 2037 y 2100

Para la determinación de la proyección del CUS para el año 2100, se encontró una limitante para su elaboración, debido a que el software Terrset 1.0 emplea técnicas estadísticas de series de tiempo y por lo cual no fue posible la realización (Jiménez-Moreno, 2007; Eastman, 2003). Para el año 2037 se utilizó la base de simulación del modelo Land Change Model del software Terrst 1.0, se generó un escenario del cambio de uso del suelo. Se observó un aumento de las zonas urbanas de las

ciudades de: Ibarra, Atuntaqui, Otavalo, San Pablo, Zuleta, El Ángel, Mira, San Gabriel, Montufar y Lita, remplazando las áreas de cultivos y pastos. Simultáneamente, se identificó una disminución de páramo y bosques, las mismas que fueron ocupadas por cultivos y pastos. La vegetación arbustiva, cultivos y pastos disminuyen en el mapa tendencial debido a la erosión y malas prácticas agrícolas.

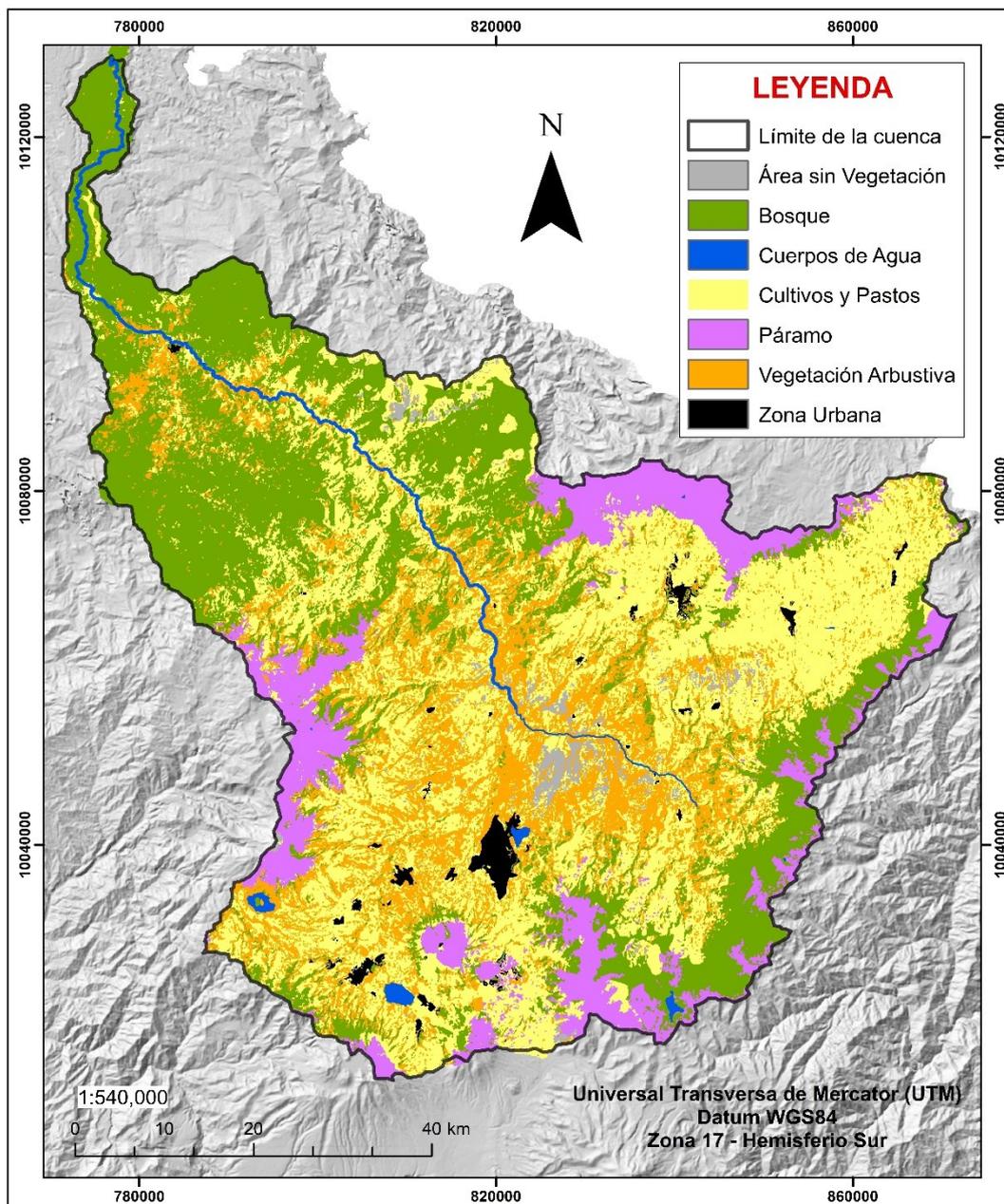


Figura 16. Modelo de cambio de uso del suelo del año 2037 del área de estudio.

Los resultados simulados para el año 2037 basados en el modelo de Markov indicaron que el porcentaje de área de tierra construida en las ciudades de la cuenca aumentó un 26%. Las principales razones del aumento de zona urbana podrían deberse al aumento gradual de la población, al desarrollo de la infraestructura y a la fácil accesibilidad (Figura 17). A la par, Kumar et al. (2014), realizó una proyección de uso del suelo para el año 2022 en la ciudad de Tiruchirappalli, donde determinó que el crecimiento de la zona urbana fue del 62.28%, y recalcó que la principal causa es el crecimiento de la población y el desarrollo de infraestructura industrial, donde coincide el aumento de zona urbana con el presente estudio. También, Wang et al. (2018), identificó en su investigación que la zona urbana aumenta el 58% para el año 2030 y recalcó que su potencial de expansión debe cumplir con; altitudes bajas, pendientes ligeramente planas y a las afueras de las ciudades con mayor densidad poblacional. En este contexto, la transformación de la cobertura y uso del suelo provoca la expansión urbana y reduce áreas rurales que cuenten con unidades productivas familiares. Sin embargo, los bosques que se encuentre en áreas remotas con pendientes abruptas se conservan, manteniendo el paisaje y conservando los recursos naturales.

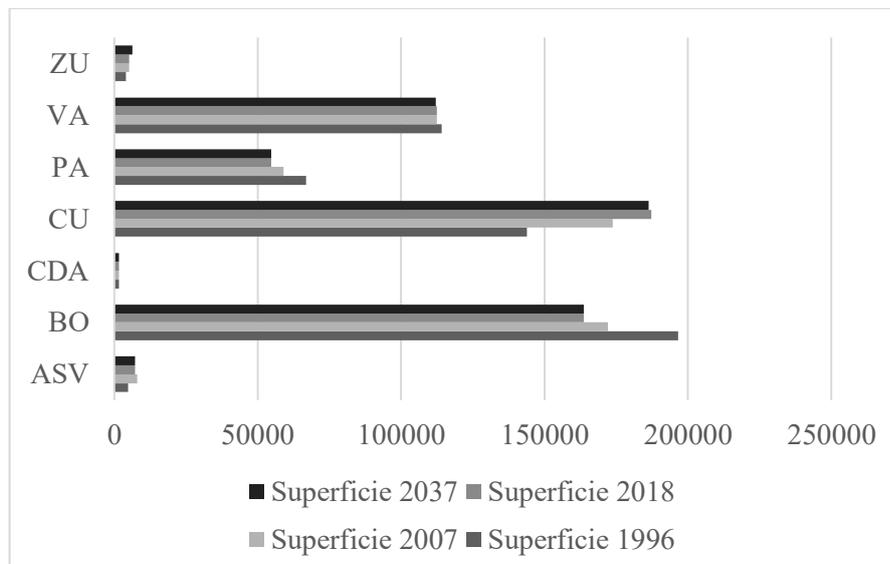


Figura 17. Cambio de cobertura y uso del suelo simulado del periodo 1996-2037 en hectáreas (ha).

4.3. Análisis de los cambios en las categorías de uso del suelo con el fin de proponer estrategias de ordenamiento territorial

A continuación, se presenta el mapa de cambio en las categorías de uso del suelo para el periodo 1996 – 2018 (Figura 18).

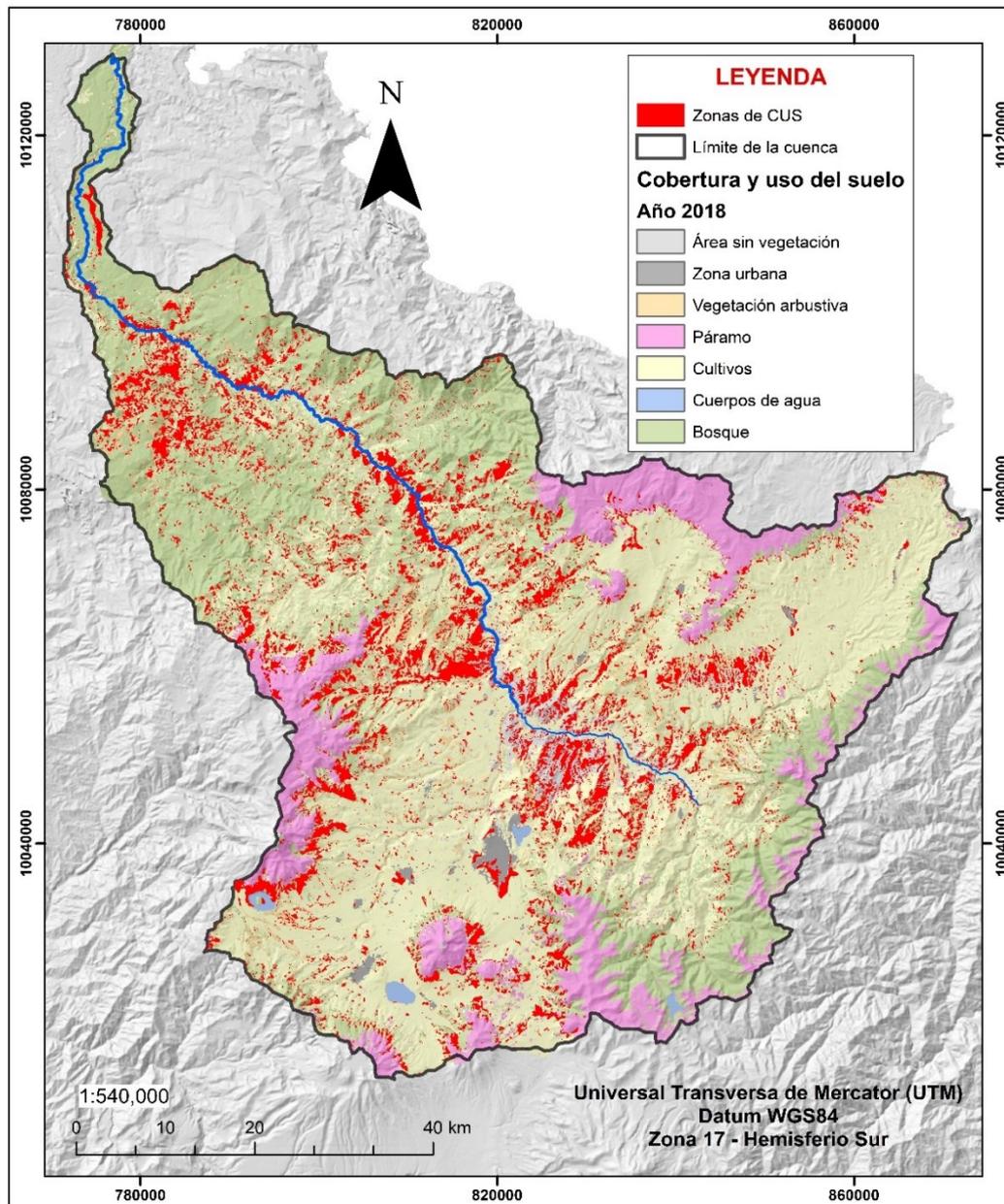


Figura 18. Mapa de cambios de uso del suelo para el periodo 1996 - 2018.

La cuenca del río Mira cuenta con varios asentamientos poblacionales a lo largo y ancho del territorio y fue necesario identificar los cambios de uso del suelo específicos que ocurren en cada lugar mediante el mapa clasificado del CUS (Figura 19).

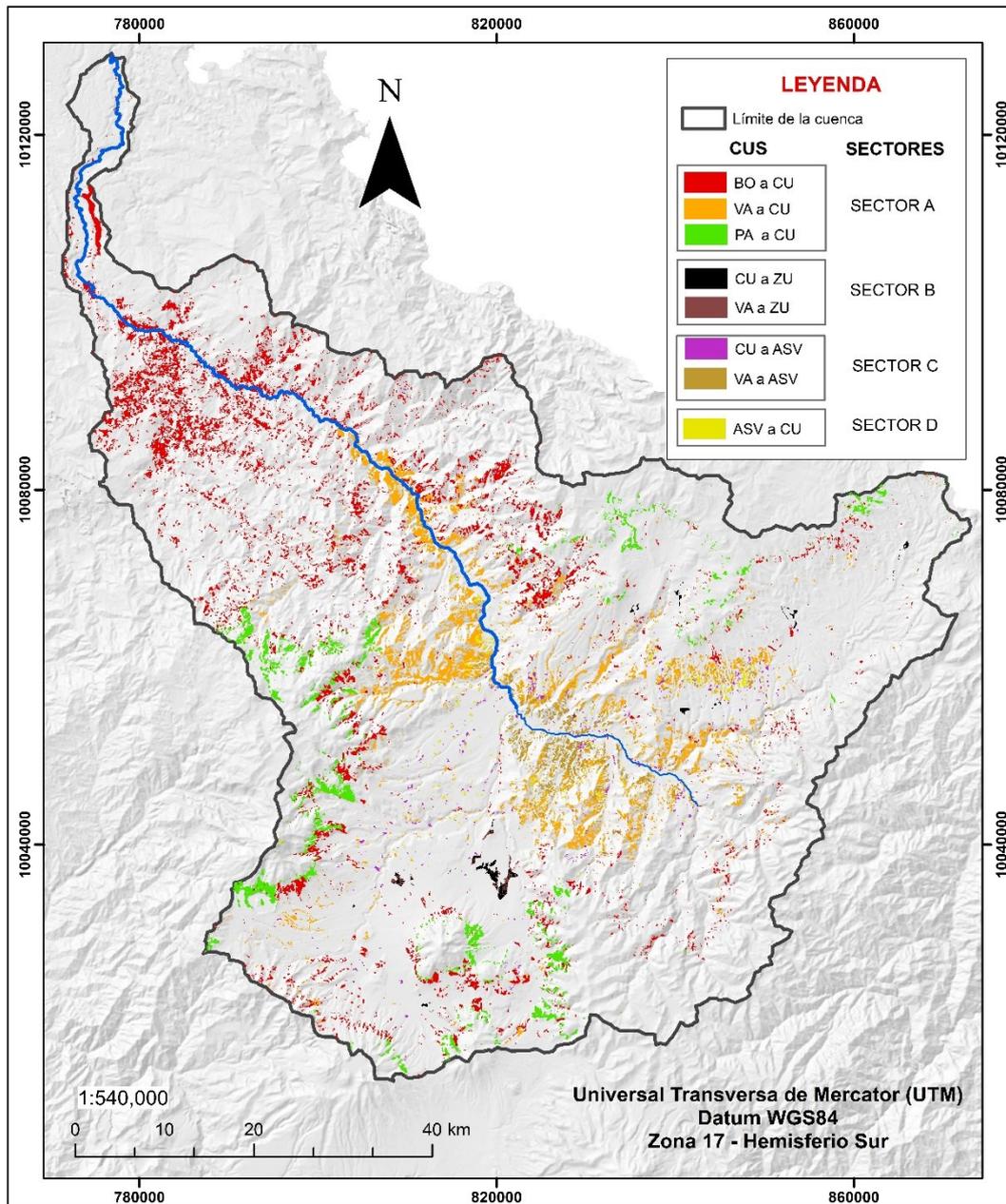


Figura 19. Mapa clasificado del CUS en el área de estudio.

Se identificaron sectores con problemas ambientales en el CUS (Tabla 17). Se propuso estrategias para su mitigación y conservación, especialmente en áreas naturales sin modificación o con potencial de cambio. Para sustentar las estrategias propuestas, se tomó en cuenta los distintos cuerpos legales nacionales vigentes, tales como: Código Orgánico del Ambiente, Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización, Código Orgánico de Planificación y Finanzas Públicas, Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Gestión y Uso del Suelo, Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente, Norma Ecuatoriana para la Construcción.

Tabla 17. Determinación de sectores en base a los cambios de uso del suelo de la investigación.

Cambio de uso del suelo	Sectores	Superficies
Bosques a Cultivos y pastos		
Vegetación arbustiva a cultivos y pastos	Sector A	44 651.09
Páramos a Cultivos y Pastos		
Cultivos y pastos a Zona urbana	Sector B	1 046.27
Vegetación arbustiva a Zona urbana		
Cultivos a Áreas sin vegetación		
Vegetación arbustiva a Áreas sin vegetación	Sector C	4621.59
Áreas sin vegetación a Cultivos	Sector D	1388.69

En base al mapa de cambios de uso del suelo se presentó las estrategias de ordenamiento territorial que se implementaron en la cuenca del río Mira con el objetivo de mitigar los cambios en las categorías de uso del suelo. Se presenta el marco ordenador Presión – Estado – Respuesta (PER) para el área de estudio. También se propuso actividades concretas para mitigar el cambio abrupto que presenta el modelo tendencial del año 2037.

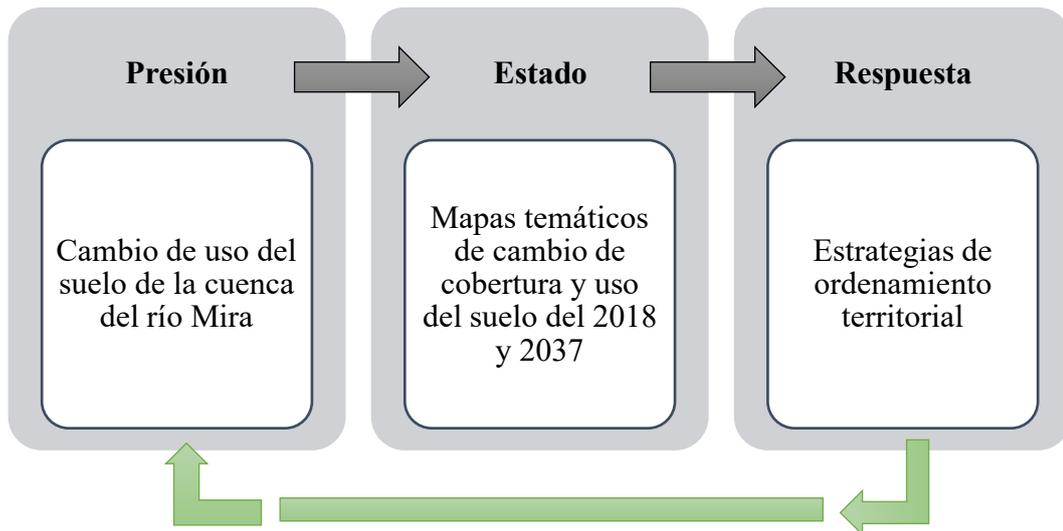


Figura 20. Marco ordenador Presión - Estado - Respuesta de la investigación.

4.3.1. Estrategias de ordenamiento territorial

En base a la interpretación de los resultados de la investigación, fue necesario proponer estrategias de ordenamiento territorial para mitigar el cambio de uso del suelo y planificar de manera integral las actividades antrópicas.

Programa de conservación de bosques y vegetación protectores

Objetivo: Mantener la superficie en categorías de representación directa para bosques y vegetación protectores.

Objetivo específico:

- Monitorear periódicamente los bosques y vegetación protectora con el fin de cumplir con la conservación ambiental.

En el mapa de cambios en las categorías de uso del suelo en la cuenca del río Mira muestra pérdida de bosques, vegetación arbustiva y páramos, por lo cual, es necesario fomentar la conservación ambiental en estas categorías.

Tabla 18. Marco ordenador presión-estado-respuesta y actividades para desarrollar el programa.

Presión CUS	Estado	Respuestas / Actividades	Estrategia / Técnica	Sector
Bosque a Cultivos y Pastos Vegetación arbustiva a Cultivos y pastos Páramos a Cultivos y pastos	Pérdida de Bosques Pérdida de Vegetación arbustiva Pérdida de Páramos	1. Aplicación de políticas públicas por parte de las actividades de los Gobiernos Autónomos Descentralizados. 2. Planificación de forma integral las creaciones de vías con el fin de no afectar las coberturas vegetales. 3. Fortalecimiento de políticas públicas que se enfoquen en el uso adecuado del suelo y en la conservación de ecosistemas por medio de planificación.	Planificación estratégica	Sector A
		Fortalecimiento los modelos metodológicos de monitoreo del Sistema Nacional de Áreas Protegidas y del Programa Socio – Bosque.	Investigación y desarrollo	Sector A
		Asesoramiento sobre la protección de bosques, páramos y vegetación arbustiva, con el fin de promover la conservación.	Educación ambiental	Sector A
		Participación de los moradores en actividades de protección de áreas naturales.	Vigilancia comunitaria	Sector A

Programa de regulación de prácticas agrícolas

Objetivos: Regular el desarrollo de prácticas agrícolas en la cuenca del río Mira.

Objetivos específicos:

- Optimizar la producción por medio de buenas prácticas ambientales.
- Fortalecer procesos de participación social con acuerdos de uso sostenible del suelo.

Las áreas agrícolas en la cuenca del río Mira mostró aumento durante el período estudiado, las principales categorías que se encontraron en disminución para que esto suceda fueron bosques, páramos y vegetación arbustiva. En consecuencia, se planteó estrategias para regular el desarrollo de las prácticas agrícolas con el fin de optimizar la producción y asegurar un uso sostenible del suelo y se identificó las zonas adecuadas para la agricultura (Figura 21).

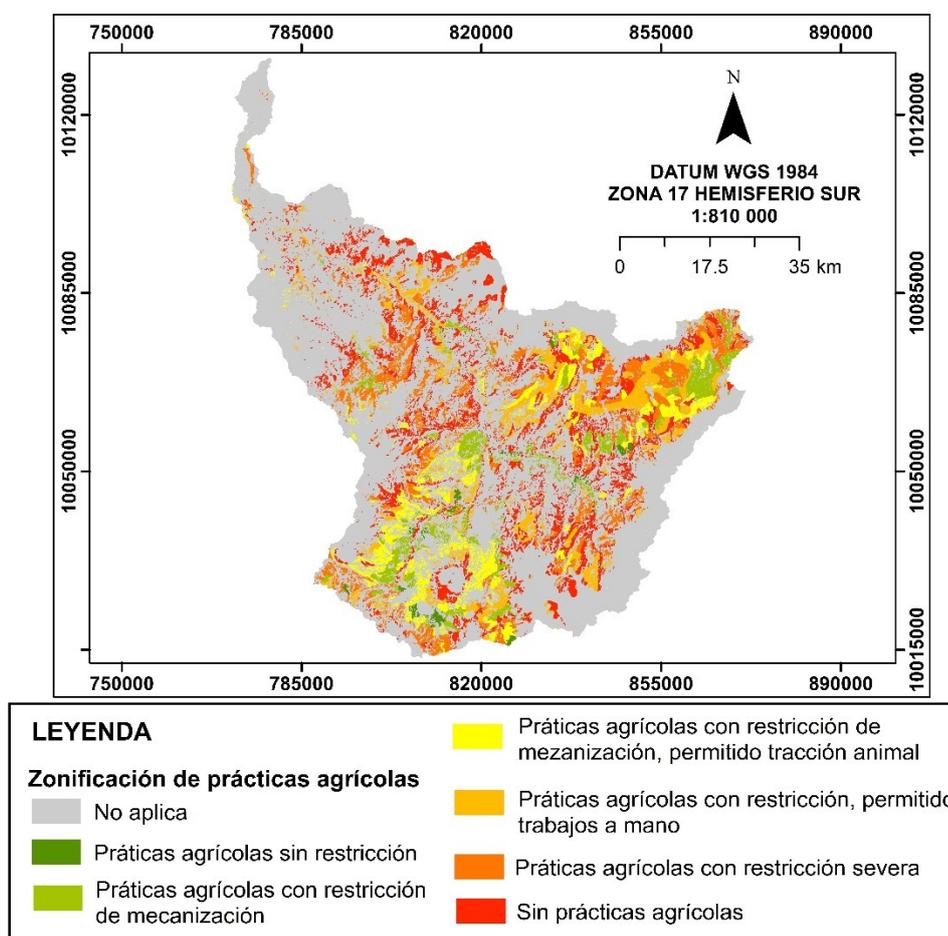


Figura 21. Zonificación de prácticas agrícolas en la investigación.

1 **Tabla 19.** Marco ordenador presión-estado-respuesta y actividades para desarrollar el programa.

Presión CUS	Estado	Respuestas / Actividades	Estrategia / Técnica	Sector
Bosque a Cultivos y Pastos Vegetación arbustiva a Cultivos y pastos Páramos a Cultivos y pastos	Ganancia de Cultivos y pastos	1. Optimización de la producción por medio de buenas prácticas ambientales como: métodos tradicionales de arado, fertilizantes naturales, rotación de cultivos, abonos verdes, barreras vivas y sistemas de riego. 2. Implementación de plantaciones de especies de leguminosas forrajeras para evitar una alta emisión de gases contaminantes. 3. Implementación sistemas agrosilvopastoriles con especies nativas.	Agricultura ecológica y producción integrada	Sector C
		Delimitación zonas de cultivos y pastos para evitar la expansión agrícola y ganadera.	Planificación estratégica	Sector A
		Seguimiento y monitoreo a las asociaciones ganaderas y agrícolas.	Seguimiento y control	Sector C
		Implementación de campañas de educación ambiental y promover el manejo adecuado de la producción agropecuarias.	Educación ambiental	Sector C

		Asesoramiento sobre el uso sostenible del suelo y sus ventajas en la producción.		
		<p>1. Implementación del uso de técnicas de manejo y conservación del suelo para cultivos en pendientes ligeramente onduladas.</p> <p>2. Regularización del avance de la frontera agrícola en cultivos en pendientes pronunciadas.</p> <p>3. Optimización la producción de pastos e incluir especies de leguminosas forrajeras.</p>	<p>Zonificación de prácticas agrícolas</p>	<p>Sector C</p>

2

Programa de regularización de la expansión urbana

Objetivo: Regularizar el crecimiento urbano en las áreas rurales de las ciudades de la cuenca del río Mira.

Objetivos específicos:

- Zonificación del territorio con la finalidad de delimitar zonas urbanas y rurales para evitar expansión urbana.

En la investigación se identificó que las zonas urbanas aumentaron su superficie durante el periodo de estudio, las principales ciudades de la cuenca mantuvieron la tendencia de aumento para el año 2037 y el mapa de índice de cambio de uso del suelo mostró que a los alrededores de las ciudades existe conflictos de uso (Figura 22). En ese contexto, se elaboró estrategias de ordenamiento territorial con la finalidad de mitigar el aumento de zona urbana.

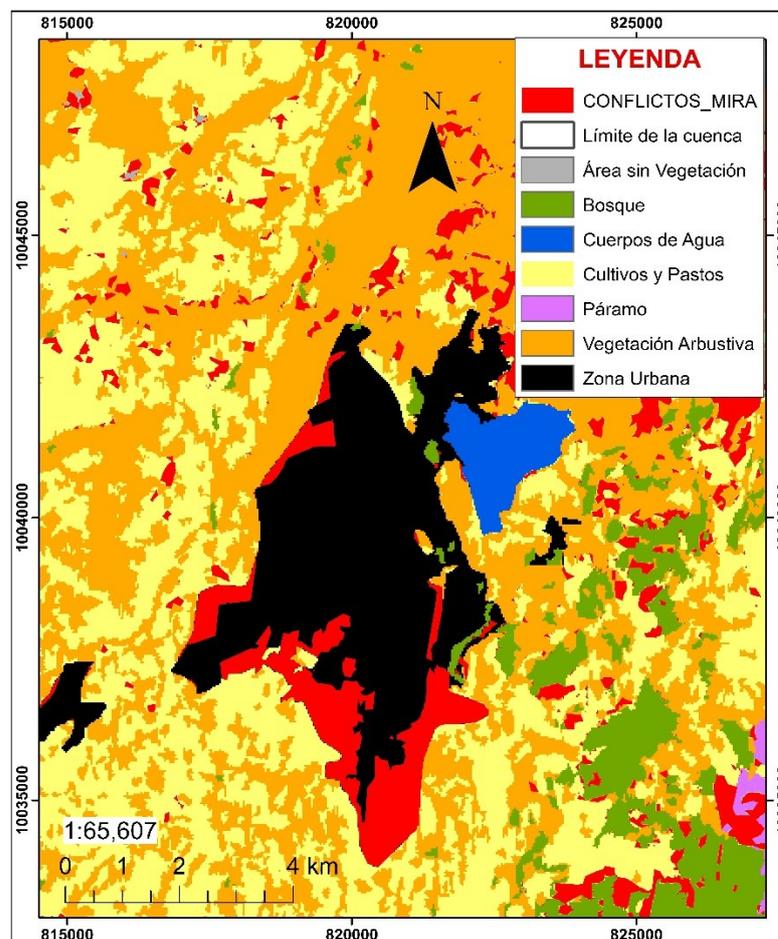


Figura 22. Crecimiento de la zona urbana en el cantón Ibarra.

Tabla 20. Marco ordenador presión - estado - respuesta y actividades para el programa.

Presión CUS	Estado	Respuestas / Actividades	Estrategia / Técnica	Sector
Cultivos y pastos a Zona urbana Vegetación arbustiva a Zona urbana	Ganancia de Zona urbana	1. Elaboración de políticas públicas para que la migración no genere problemas de organización territorial y social dentro de los cantones del área de estudio. 2. Zonificación del territorio con la finalidad de delimitar las zonas urbanas y rurales para mitigar la expansión urbana. 3. Capacitación sobre construcción vertical en zonas de crecimiento urbano.	Planificación estratégica	Sector B
		Capacitación y concientización sobre problemas ambientales como: contaminación, deforestación y problemas demográficos.	Educación ambiental	Sector B
		Seguimiento de las áreas de aumento de zona urbana con la finalidad de identificar asentamientos irregulares o en zonas de riesgo con herramientas de SIG y validación in-situ.	Monitoreo y seguimiento	Sector B

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Esta investigación demostró que el cambio de cobertura y uso del suelo está fuertemente vinculado a las actividades antrópicas. Los resultados demostraron que si no se mitiga las causas el cambio potencial podría afectar a ecosistemas vulnerables como: páramo y bosque. Este estudio destaca al sector A de la cuenca del río Mira como el lugar propicio para conservar. Facilitó una mejor comprensión de las dinámicas de cambio de uso del suelo al grado de determinar la tendencia de cambio. Las conversiones de páramo y bosque a cultivos y pastos son un fenómeno común en la cuenca debido a la intervención humana. Sin embargo, la transición alarmante es la pérdida de bosque en el periodo estudiado, lo que resulta en un futuro afectaciones al bienestar humano.

Esta investigación tuvo como objetivo comprender los escenarios futuros del cambio de cobertura y uso del suelo mediante la incorporación del modelo CA-MARKOV, y la precisión general de la predicción para el año 2018 fue de aproximadamente el 83%, clasificación casi perfecta. El escenario tendencial para el año 2037, mostró disminución de ecosistemas vulnerables (bosque y páramo) y un aumento de la frontera agrícola. En este sentido, las principales actividades productivas y la expansión urbana son las causas principales de cambio de cobertura y uso del suelo.

Esta investigación contribuyó con estrategias de ordenamiento territorial con el fin de mitigar el impacto y el cambio de cobertura y uso del suelo en la cuenca. Se generó tres programas enfocados a conservar los ecosistemas frágiles y a garantizar la unidad productiva familiar que propone el gobierno nacional. Mismas que, permitieron hasta la actualidad realizar una conservación bajo el principio pro natura y la efectiva inversión de capital.

El cambio de cobertura y uso del suelo tendencial es negativo para los ecosistemas frágiles debido a su fragmentación y deforestación, y si la tendencia se mantiene en

los próximos años el modelo presentado no tendrá mayores diferencias a lo que podría ser la realidad.

Finalmente, la realización de esta investigación contribuyó a la sociedad con ideas claras y precisas para el desarrollo del ordenamiento territorial con un enfoque ecológico, y puede servir para los Gobiernos Autónomos Descentralizados como base técnico para formular políticas públicas locales con la finalidad de realizar un ordenamiento territorial integral.

5.2. Recomendaciones

Esta investigación logró identificar los principales problemas ambientales que podrían ser mitigados por medio de políticas públicas. En ese contexto, se recomienda que los GAD impulsen desde el ámbito de sus competencias la conservación de bosques y vegetación protectora existentes en sus cantones, con la finalidad de promover la conservación de ecosistemas vulnerables. Simultáneamente, fortalecer los programas de restauración de ecosistemas degradados por el avance de la frontera agrícola, y vigorizar los existentes.

De igual forma, complementar la planificación del ordenamiento territorial con principios ambientales de conservación, apoyado en un marco de políticas ambientales generado por el gobierno nacional. Los GAD podrán requerir la participación de equipos multidisciplinarios con la finalidad de organizar el territorio con equilibrio productivo y de conservación.

Por otro lado, el modelo tendencial realizado con el método de Markov no proyecta periodos de tiempo diferentes, por lo que es importante definir un periodo de tiempo de análisis de cambio de uso del suelo desde el pasado hasta la actualidad, para luego sumar ese tiempo al futuro.

También, fue importante definir las variables que se utilizaron para modelar el mapa tendencial para el año 2037, de lo contrario el método procede a marcar la transición sin restricción alguna. Las variables básicas a utilizar pueden ser: vías, crecimiento de la zona urbana, pendientes y el modelo de elevación. Para dar un mayor realce a la investigación, se introdujo la restricción de cambio a los bosques y vegetación protectora y al Sistema Nacional de Área Protegidas.

Finalmente, es recomendable ampliar la planificación de ordenamiento territorial en lo que respecta a la unidad base, integrar el sistema de cuenca hidrográfica y que sirva de línea base para planificar el territorio a nivel de cantón. De esta manera se lograría integrar racionalmente todos los procesos naturales y socioeconómicos que se desarrollan en la cuenca hidrográfica.

REFERENCIAS

- Amin, A. Choumert, J. Combes, J. Combes-Motel, P. Kéré, E. Ongono-Olinga, J. y Schwartz, S. (2018). Neighborhood effects in the Brazilian Amazônia: Protected areas and deforestation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 93, 272-288.
- Amarnath, G. Babar, S. y Merthy, M. (2017). Evaluating MODIS-vegetation continuous field products to assess tree cover change and forest fragmentation in India – A multi-scale satellite remote sensing approach. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20, 157-168.
- Ansari, A. y Golabi, M. (2018). Prediction of spatial land use changes based on LCM in a GIS environment for Desert Wetlands – A Case study: Meighan Wetland, Iran. *International Soil and Water Conservation Research* 7, 64-70.
- Armenteras, D. González, T. Retana, J. y Espelta, J. (Eds). (2016). *Degradación de bosques en Latinoamérica: Síntesis conceptual, metodologías de evaluación y casos de estudio nacionales*. Publicado por IBERO-REDD+
- Armenteras, D. Gonzales, T. Vergara, L. Luque, F. Rodríguez, N. y Bonilla, M. (2016). Revisión del concepto de ecosistema como “unidad de la naturaleza” 80 años después de su formulación. *Ecosistemas*, 25, 83-89.
- Armenteras, D. Murcia, U. Gonzáles, T. Barón, O. y Arias, J. (2019). Scenarios of land use and land cover change for NW Amazonia: Impact on forest intacness. *Global Ecology and Conservation*, 17, doi: 10.1016/j.gecco.2019.e00567.
- Arnand, J. Gosain, A. y Khosa, R. (2018). *Prediction of land use changes based on Land Change Modeler and attribution of changes in the water balance of Ganga basin to land use change using the SWAT model*. *Science of The Total Environment*, 644, 503-519.

- Behera, M. D. Tripathi, P. Das, P. Srivastava, S. K. Roy, P. Joshi, C. Joshi, C. ... Krishnamurthy, Y. (2018). Remote sensing based deforestation analysis in Mahanadi and Brahmaputra river basin in India since 1985. *Environmental Management*, 206, 1192-1203.
- Buytaert, W. Wyseure, G. De Bievre, B. y Deckers, J. (2005). The effects of land-use changes on the hydrological behavior of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes*, 19, 3985-3997.
- Caviedes, M. (2018). Memorias del Primer Simposio en Suelos y Nutrición de Cultivos 2018. Archivos Académicos USFQ. 11, 1-41. Recuperado de: https://www.usfq.edu.ec/publicaciones/archivosacademicos/Documents/archivos_academicos_011.pdf
- Cervantes Zavala, R. Faustino, J. Jiménez Otárola, F. Benegas, L. y Zavala, R. C. (2008). Principios y criterios para la cogestión de cuencas hidrográficas en América Tropical. *Recursos Naturales y Ambiente*, 56, 59-65.
- Chuqín, H. y Ibarra, E. (2015). Diagnóstico de prácticas de manejo agropecuario en el cantón Mira, provincia del Carchi. *SATHIRI Sembrador*, 8, 40-59.
- Damanik-Ambarita, M. Boets, P. Nguyen, H. Eurie, M. Everaert, G. Lock, K. ... Goethals, P. (2018). Impact assessment of local land use on ecological water quality of the Guayas river basin (Ecuador). *Ecological Informatics*, 48, 226-237.
- De Freitas, M. Muñoz, P. Dos Santos, J. y Alves, D. (2018). Land use and cover change modelling and scenarios in the Upper Uruguay Basin (Brazil). *Ecological Modelling*, 384, 128-144.
- Dwomoh, F. Wimberly, C. Cochrane, M y Numata, I. (2019). Forest degradation promotes fire during drought in moist tropical forests of Ghana. *Forest Ecology and Management*, 440, 158-168.

- Endara, R. (2018). *Efectos de la deforestación en la producción de caudales en la cuenca media alta del río Mira para el período 2000-2014* (Tesis de Pregrado). Universidad Técnica del Norte, Ibarra.
- Ervinia, A. Huang, J. Huang, Y. y Lin, J. (2019). Coupled effects of climate variability and land use pattern on surface water quality: An elasticity perspective and watershed health indicators. *Science of the Total Environment*, 693, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133592
- FAO. (2018). El estado de los bosques del mundo - Las vías forestales hacia el desarrollo sostenible. Roma. Recuperado de: <https://www.google.com/search?q=EL+ESTADO+DE+LOS+BOSQUES+DEL+MUNDO&oq=EL+ESTADO+DE+LOS+BOSQUES+DEL+MUNDO&aqs=chrome..69i57j0l7.1224j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8#>
- Feng, H. Guo, J. Han, M. Wang, W. Peng, C. Jin, J. ... Yu, S. (2020). A review of the mechanisms and controlling factors of methane dynamics in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, doi: 10.1016/j.foreco.2019.117702
- Gibson, L. Much, Z. Palmer, A. y Mantel, S. (2018). Future land cover change scenarios in South African grasslands – implications of altered biophysical drivers on land management. *Heliyon* 4(7).
- Gómez, L. Gallego, B. y Naranjo, L. (2017). Atlas socioambiental de las cuencas transfronterizas Mira y Mataje: aportes para su ordenamiento y gestión integral Colombia-Ecuador. Cali: WWF-Colombia. Recuperado de: http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/atlas_socioambiental_de_las_cuencas_mira_y_mataje_aportes_para_su_ordenamiento_y_gestion.pdf
- Gómez-Orea, D. y Gómez-Villarino, M. (2014). Marco conceptual para la ordenación territorial y reflexiones sobre el proceso ecuatoriano en la materia. En Cordero, J. Coordinador. Autonomías y ordenación territorial

y urbanística: memorias IX simposio nacional de desarrollo urbano y planificación territorial. Cuenca, Ecuador.

González, C. A. (2009). *Assessing the Land Cover and Land Use Change and Its Impact on Watershed Services in a Tropical Andean Watershed of Peru* (Tesis de Pregrado). University of Jyväskylä. Finlandia.

Halmy, W. Gessler, P. Hicke, J. y Salem, B. (2015). Land use/land cover change detection and prediction in the north-western coastal desert of Egypt using Markov-CA. *Applied Geography*, 63, 101-112.

Hamad, R. Balzter, H. y Kolo, K. (2018). Predicting land use / land cover changes using a CA-Markov model under two different scenarios. *Sustainability*, 10, 3421–3423.

Hegazy, I. y Kalopp, M. (2015). Monitoring urban growth and land use change detection with GIS and remote sensing techniques in Daqahlia governorate Egypt. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4, 117-124.

Hermosilla, T. Wulder, M. White, J. Coops, N. Pickell, P. y Bolton, D. (2019). Impact of time on interpretations of forest fragmentation: Three-decades of fragmentation dynamics over Canada. *Remote Sensing of Environment*, 222, 65-77.

Islam, K. Rahman, M. y Jashimuddin, M. (2018). Modeling land use change using Cellular Automata and Artificial Neural Network: The case of Chunati Wildlife Sanctuary, Bangladesh. *Ecological Indicators*, 88, 439-453.

John, J. Chithra, N. y Thampi, S. (2019). Prediction of land use/cover change in the Bharathapuzha river basin, India using geospatial techniques. *Environ Monit Assess*, 191, 15.

Kumar, S. Radhakrishnan, N. y Mathew, S. (2014). Land use change modelling using a Markov model and remote sensing. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 5, 145-156.

- Landis, J. R. y Koch, G. G. (1977). True Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33, 159-174.
- Lambin, E. Turner, B. Geist, H. Agbola, S. Angelsen, A. Bruce, J. ... Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11, 261-269.
- Lang, Y. y Song, W. (2019). Quantifying and mapping the responses of selected ecosystem services to projected land use changes. *Ecological Indicators*, 102, 186-198.
- Lazo, M. y Parraga, G. (2012). *Zonificación ambiental para el ordenamiento territorial de la subcuenca del río Paucartambo* (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú. Lima - Perú.
- López, V. H. Balderas, M. A. Chavez, M. C. Pérez, J. I. y Gutierrez, J. G. (2015). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano. *Ciencia Ergo Sum*, 22, 136-144.
- López, M. (2015). El sistema de planificación y el ordenamiento territorial para Buen Vivir en el Ecuador. *Geosp-Espaco e Tempo*, 19, 297-321.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2018). Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión del Suelo: conceptos básicos, primera edición. Quito, Ecuador.
- Mondal, P. McDermind, S. y Qadir, A. (2020). A reporting framework for Sustainable Development Goal 15: Multi-scale monitoring of forest degradation using MODIS, Landsat and Sentinel data. *Remote Sensing of Environment*, doi: 10.1016/j.rse.2019.111592
- Moreta, J. (2008). *La eutrofización de los lagos y sus consecuencias*. (Tesis de Pregrado). Universidad Técnica del Norte. Ibarra – Ecuador.

- Otavo, S. y Echeverría, C. (2017). Fragmentación progresiva y pérdida de hábitat de bosques naturales en uno de los hotspot mundiales de biodiversidad. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 924-935.
- Pang, M. Yang, S. Zhang, L. Li, Y. Kong, F. y Wang, C. (2019). Understanding the linkages between production activities and ecosystem degradation in China: An ecological input-output model of 2012. *Journal of Cleaner Production*, 218, 975-984.
- Pantoja, J. y Poats, S. (2019). Memorias del seminario: Investigación sobre el agua, su gestión y los servicios ecosistémicos en la cuenca del Río Mira – Ecuador. 21-22 de Nov. Universidad Técnica del Norte – UTN y Consorcio Binacional Mira Mataje – CBMM. Ibarra, Ecuador.
- Paula, P. Zambrano, L. y Paula, P. (2018). Multitemporal Analysis of vegetation change at Chimborazo Reserve as a result of climate change. *Enfoque UTE*, 9, 125 – 137.
- Paul, B. K. y Rashid H. (2017). Land Use Change and Coastal Management. En B. K. Paul y H. Rashid. (Eds.), *Climatic Hazards in Coastal Bangladesh* (pp. 183-207). Bangladesh. Editorial Butterworth-Heinemann.
- Pineda, P. O. (2011). *Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el municipio de Valle de Santiago* (Tesis de Postgrado). Centro de Investigación en Geografía y Geomática Ingeniero Jorge Tamayo, México, D. F.
- Puttker, T. Crouzeilles, R. Almeida-Gomes, M. Schmoeller, M. Maurenza, D. Alves-Pinto, H. ... Fonseca, C. (2020). Indirect effects of habitat loss via habitat fragmentation: A cross-taxa analysis of forest-dependent species. *Biological Conservation*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108368>
- Ren, X. Lv, Y. y Li, M. (2017). Evaluating differences in forest fragmentation and restoration between western natural forests and southeastern plantation

forests in the United States. *Journal of Environment Management*, 188, 268-277.

Reydon, B. Fernandes, V. y Telles, T. (2019). Land governance as a precondition for decreasing deforestation in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy*, doi: 10.1016/j.landusepol.2019.104313

Riccioli, F. El Asmar, T. El Asmar, J. y Fratini, R. (2012). Use of cellular automata in the study of variables involved in land use changes. *Environ Monit Assess*, 185, 5361-5374.

Rodríguez-Echeverry, J. Echeverría, C. Oyarzún, C. y Morales, L. (2018). Impact of land-use change on biodiversity and ecosystem services in the Chilean temperate forests. *Landscape Ecol*, 33, 439-453.

Sathees, K. Nisha, R. y Samson, Mathew. (2014). Land use change modelling using a Markov model and remote sensing. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 5, 145-156.

Shirmohammadi, B. Malekian, A. Salajegheh, A. Taheri, B. Azarnivand, H. Malek, Z. y Verburg, P. (2020). Scenario analysis for integrated water resources management under future land use change in the Urmia Lake region, Iran. *Land Use Policy*, 90, doi: 10.1016/j.landusepol.2019.104299

Tapia-Armijos, M. Homeier, J. y Draper, D. (2017). Spatio-temporal analysis of the human footprint in South Ecuador: Influence of human pressure on ecosystems and effectiveness of protected areas. *Applied Geography*, 78, 22-32.

Tian, G. Ouyang, Y. Quan, Q. y Wu, J. (2011). Simulating spatiotemporal dynamics of urbanization with multi-agent systems - A case study of the Phoenix metropolitan region, USA. *Ecological Modelling*, 222, 1129-1138.

Van Assche, K. Gruezmacher, M. y Deacon, L. (2019). Land use tools for tempering boom and bust: Strategy and capacity building in governance. *Land Use Policy*, doi: 10.1016/j.landusepol.2019.05.013

- Vandegrift, R. Thomas, D. Roy, B. y Levy, M. (2018). Alcance de las concesiones mineras recientes en Ecuador. *Rainforest Information Center*, Recuperado de: <https://ecuadorendangered.com/research/reports/RIC-Mapping-Report-v1.1-20180117-eng.pdf>
- Venter, O. Sanderson, E. Magrach, A. Allan, J. Beher, J. Jones, K. ... Watson, J. (2016). Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and and implications for biodiversity conservation. *Nature Communications*, 7, doi: 10.1038/ncomms12558
- Vilca, L. (2008). *Caracterización de las principales fuentes hídricas y lineamientos de conservación en la cuenca baja del río Mira, provincia del Carchi* (Tesis de Pregrado). Universidad Técnica del Norte, Ibarra – Ecuador.
- Wang, Y. Li, X. Zhang, Q. Li, J. y Zhou X. (2018). Projections of future land use changes: Multiple scenarios-based impacts analysis on ecosystem services for Wuhan city, China. *Ecological Indicators*, 94, 430-445.
- Wu, Y. Tao, Y. Yang, G. Ou, W. Pueppke, S. Sun, X. ...Tao, Q. (2019). Impact of land use change on multiple ecosystem services in the rapidly urbanizing Kunshan City of China: Past trajectories and future projections. *Land Use Policy*, 85, 419-427.
- Xia, M. Zhang, Y. Zhang, Z. Liu, J. Ou, W. y Zou, W. (2020). Modelling agricultural land use changes in a rapid urbanizing town: Linking the decisions of government, peasant households and enterprises. *Land Use Policy*, doi: 10.1016/j.landusepol.2019.104266.
- Yang, X. Zheng, X. y Chen, R. (2014). A land use change model: Integrating landscape pattern indexes and Markov-CA. *Ecological Modelling*, 283, 1-7.
- Yang, X. Zheng, X. y Li, L. (2012). A spatiotemporal model of land use change based on ant colony optimization, Markov chain and cellular automata. *Ecological Modelling*, 233, 11-19.

Yang, Y. Wang, K. Liu, D. Zhao, X. y Fan, J. (2019). Effects of land-use conversions on the ecosystem services in the agro-pastoral ecotone of northern China. *Journal of Cleaner Production*, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119360

Zamora, G. y Carrión, A. (2013). *Planificación del Desarrollo y Ordenamiento Territorial*. Segunda Edición. Editorial IAEN. Quito, Ecuador.

ANEXOS



Anexo 1. Colección de firmas espectrales de categoría bosque en El Ángel, Carchi.



Anexo 2. Colección de firmas espectrales de categoría Áreas sin Vegetación en El Ángel, Carchi.



Anexo 3. Colección de firmas espectrales de categoría cultivos en Mira, Carchi.



Anexo 4. Colección de firmas espectrales de categoría Zona Urbana en Urcuqui.



Anexo 5. Colección de firmas espectrales de categoría Cultivos en Santa Rosa del Tejar, Ibarra.



Anexo 6. Presentación del proyecto de investigación en un seminario por parte del tutor Ingeniero Paúl Arias.